

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

**Snižování drsnosti povrchu při frézování
tvarových ploch**

*Decreasing Surface Roughness of Free Form
Surface Milling*

Student: Bc. Ladislav Blanarovič

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Marek Sadílek, Ph.D.

Ostrava 2018

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Ladislav Blanarovič**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Téma: **Snižování drsnosti povrchu při frézování tvarových ploch**
Decreasing Surface Roughness of Free Form Surface Milling
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor parametrů struktury obrobeného povrchu.
2. Porovnání a technický rozbor 3osého a 5osého frézování.
3. Stanovení 2D a 3D drsnosti obrobených ploch po 3osém a 5osém frézování.
4. Závěry pro realizaci v praxi.

Seznam doporučené odborné literatury:

SADÍLEK, M. *Počítačová podpora výroby*. VŠB – TU Ostrava, 2011, 80 s., Dostupné na: http://www.346.vsb.cz/studijni_literatura.html.
SADÍLEK, M. *Zvyšování efektivnosti obrábění s využitím CAD/CAM systému - Disertační práce*. Ostrava: Fakulta strojní, VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2005, 123 stran, 23 příloh.
SADÍLEK, M.; ČEP R.; OTÁHAL, D. Vliv náklonu nástroje při frézování. *Odborná konference - Frézování IV*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2007, s. 13 – 18. ISBN 80-214-3239-X.
BUMBÁLEK, B. NOVÁK, Z. VALA, P. OŠŤÁDAL. Vliv dokončovacích operací na změnu povrchové vrstvy součástí. *Strojírenská technologie - Časopis pro vědu, výzkum a výrobu*. 09/2006, roč. XI, č. 3, s. 9-16. ISSN 1211-4162.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Marek Sadílek, Ph.D.**

Datum zadání: 08.12.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018


doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry




doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

..

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 21.5.2018.....

Blauzer
.....
podpis studenta

Prohlašuji, že:

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb., autorský zákon, zejména §35 + užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB – TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.
- bylo sjednáno, že VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavře licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohou jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejích skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č.111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 21.5.2018

.....
podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce: Ladislav Blanarovič

Adresa trvalého pobytu autora: Hulín, Zahradní 873

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Blanarovič, L. *Snižování drsnosti povrchu při frézování tvarových ploch: Diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie 2018, 72 s. Vedoucí práce: doc. Ing. Marek Sadílek, Ph.D.

V diplomové práci je řešena problematika snižování drsnosti povrchů při frézování tvarových ploch. Primárním cílem diplomové práce je analýza drsnosti povrchů experimentálních vzorků obrobených metodou 3osého, 3+2osého a 5osého frézování. V teoretické části je zmíněn současný stav 2D a 3D měření drsnosti povrchu, metody měření a rozbor jednotlivých parametrů drsnosti povrchu. Praktická část se věnuje rozboru drsnosti povrchů po obrábění 3osého, 3+2osého a 5osého frézování. Závěrečná část se věnuje závěrům pro realizaci v praxi.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

Blanarovič, L. *Decreasing Surface Roughness of Free Form Surface Milling: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Working and Assembly and Engineering Metrology, 2018, 72 p. Thesis head: doc. Ing. Marek Sadílek, Ph.D.

The master thesis deals with the issue of reduction surface roughness in milling of shaped surfaces. The primary aim of this master thesis is to analyze the surface roughness of experimental samples machined by the 3-axis, 3+2-axis and 5-axis milling methods. In the theoretical part, the current state of 2D and 3D measurements of surface roughness, methods of measurement and analysis of individual parameters of surface roughness are mentioned. The practical part deals with roughness analysis of surfaces after machining 3-axis, 3+2-axis and 5-axis milling. The final part deals with the conclusions for implementation in practice.

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	1
Úvod	3
1. Aktuální stav 2D a 3D měření drsnosti povrchu	4
2. Metody snímání povrchu	4
2.1 Dotykový způsob měření	5
2.1.1 Měření struktury povrchu dotykovými profilometry	5
2.2 Bezdotykové metody	7
3. Parametry profilu drsnosti	9
3.1 Profil povrchu	9
3.2 Filtr profilu	10
3.3 Drsnost povrchu	11
3.4 Základní parametry dle ČSN EN ISO 4287	11
3.4.1 Výškové parametry profilu drsnosti	12
4. Plošné (3D) hodnocení textury povrchu	14
4.1 Filtrace povrchu	17
4.2 Parametry pole	19
4.2.1 S-Parametry	19
4.2.2 V-Parametry	23
5. Třískové obrábění vstřikovacích forem	25
5.1 Strategie frézování dutin vstřikovacích forem	25
5.2 Jakost povrchů součástí forem	25
5.3 Vliv drsnosti povrchů na plnění dutiny formy	26
6. Experimentální část	27
6.1 Popis měřicího přístroje Alicona IF	27
6.2 Princip měření Alicony IF	29
6.3 Software Alicona InfiniteFocus	30
7. Rozbor parametrů drsnosti povrchu po 3osém, 3+2osém a 5osém frézování	32
7.1 Popis měřeného vzorku	32
7.2 Vyhodnocované parametry	33

7.3	Měřená místa na vzorku.....	33
7.4	Měřená šířka, délka.....	35
7.5	Rovinná Plocha 1	36
7.5.1	Hodnocení profilových parametrů Ra, Rz.....	36
7.5.2	Hodnocení parametrů Sa, Sz	37
7.5.3	Hodnocení parametru Svk	39
7.5.4	Hodnocení parametru Vvv.....	39
7.5.5	Celkové porovnání náklonů pro rovinnou plochu 1	40
7.6	Mírně zaoblená plocha 2.....	41
7.6.1	Hodnocení profilových parametrů Ra, Rz.....	41
7.6.2	Hodnocení parametrů Sa, Sz	43
7.6.3	Parametr Svk	45
7.6.4	Parametr Vvv	46
7.6.5	Celkové porovnání náklonů pro mírně zaoblenou plochu 2.....	46
7.7	Údolí Plocha 3	48
7.7.1	Hodnocení profilových parametrů Ra, Rz.....	48
7.7.2	Hodnocení parametrů Sa, Sz	50
7.7.3	Parametr Svk	51
7.7.4	Parametr Vvv	51
7.7.5	Celkové porovnání náklonů pro údolí plochu 3	52
7.8	Rovinná plocha 4	53
7.8.1	Hodnocení profilových parametrů Ra, Rz.....	53
7.8.2	Hodnocení parametrů Sa, Sz	54
7.8.3	Hodnocení parametru Svk	56
7.8.4	Hodnocení parametru Vvv.....	57
7.8.5	Celkové porovnání náklonů pro rovinnou plochu 4	58
	Závěr	59
8.	Seznam použité literatury.....	62
9.	Seznam příloh.....	65

Seznam použitých zkratk a symbolů

Zkratka/ Symbol	Význam	Jednotky
2D	dvourozměrné	[-]
3D	třírozměrné	[-]
CAD	Computer Aided Design (počítačem podporované projektování)	[-]
CAM	Computer Aided Manufacturing (počítačem podporovaná konstrukce)	[-]
ČSN EN ISO	Česká technická norma, která zavádí do soustavy českých norem evropskou normu identickou s mezinárodní normou ISO	[-]
F-filtr	filtr pro odstranění vlivu tvaru	[-]
IF	Infinite Focus	[-]
L-filtr	plošný dlouhovlnný filtr	[-]
NC	Numerical Control (číslicové řízení)	[-]
P-parametry	parametry základního profilu	[-]
R-parametry	parametry profilu drsnosti	[-]
S-F povrch	povrch po aplikaci S-filtru a F-operace	[-]
S-filtr	plošný krátkovlnný filtr	[-]
S-L povrch	povrch po aplikaci S-filtru, L-filtru a F-operace	[-]
S-parametry	plošné parametry	[-]
SW	software	[-]
V-parametr	objemové parametry	[-]
W-parametry	parametry profilu vlnitosti	[-]
Ra	průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti	[μm]
Rp	největší výška výstupku profilu	[μm]
Rq	průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu	[μm]
Rt	celková výška profilu drsnosti	[μm]
Rv	největší hloubka prohlubně profilu drsnosti	[μm]
Rz	největší výška profilu drsnosti	[μm]
Sa	aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu	[μm]
Sal	poměr aspektu textury	[-, %]
Sdq	základ průměrného čtverce gradientu omezené stupnicí povrchu	[-]
Sdr	poměr rozvinuté mezifázové plochy omezené stupnicí povrchu	[%]
Sk	výška jádra	[μm]
Sku	špičatost omezené stupnice povrchu	[-]
Smq	poměr materiálu	[%]
Smr1	poměr materiálu	[%]
Smr2	poměr materiálu	[%]
Sp	maximální výška piku omezené stupnice povrchu	[μm]
Spc	aritmetický průměr zakřivení piku	[-]
Spd	hustota piku	[μm^{-1}]
Spk	redukováná výška piku	[μm]
Spq	základ průměrné úchylky čtverců plošiny	[μm]
Sq	základ průměrné výšky čtvercem omezené stupnice povrchu	[μm]

Ssk	šikmost omezené stupnice povrchu	[-]
Std	směr textury omezené stupnice povrchu	[°]
Str	délka autokorelace	[μm]
Sv	maximální hloubka prohlubně omezené stupnice povrchu	[μm]
Svk	redukována hloubka údolí	[μm]
Svq	základ průměrné úchylky čtverců údolí	[μm]
Sxp	extrémní výška piku	[μm]
Sz	maximální výška omezené stupnice povrchu	[μm]
Vmc	jádro objemu materiálu omezené stupnicí povrchu	[$\text{ml}\cdot\text{m}^{-2}$]
Vmp	pik objemu materiálu omezené stupnicí povrchu	[$\text{ml}\cdot\text{m}^{-2}$]
Vvc	neplatný objem jádra omezené stupnice povrchu	[$\text{ml}\cdot\text{m}^{-2}$]
Vvv	neplatný objem údolí omezené stupnice povrchu	[$\text{ml}\cdot\text{m}^{-2}$]
ln	vyhodnocovaná délka	[mm]
lr	základní délka pro profil drsnost	[mm]
λ	vlnová délka	[nm]
λ_c (λ cut-off)	mezní vlnová délka	[nm]
λ_f	vlnová délka dlouhovlnného filtru profilu	[nm]
λ_s	vlnová délka krátkovlnného filtru profilu	[nm]

Úvod

Jakost povrchu je v současnosti velice důležitou součástí ve strojírenské výrobě. Zákazníci v současnosti kladou mnohem větší důraz na jakost povrchu nežli dříve. Jakost povrchů tj. drsnost, resp. mikrogeometrie povrchu je důležitým parametrem ovlivňují výrazně životnost a spolehlivost provozu součástí i estetiku výrobků.

V dnešní době, díky rozvoji vědy a techniky a použití frézovacích center lze obrábět velice složité tvary, např. zápustky či různé formy. Pro obrábění složitých tvarů se používá 5osého a 3+2osého frézování, protože klasickým 3osým frézováním nelze obrobit některé plochy. Právě vhodnost, použití jednotlivých náklonů, výrazně ovlivňuje požadovanou drsnost povrchu.

A právě tato diplomová práce se zabývá vlivem jednotlivých náklonů na drsnost povrchu. Cílem diplomové práce je zjistit o jaký úhel je nejefektivnější nástroj naklonit z hlediska drsnosti povrchu.

Drsnost povrchu lze měřit dvěma způsoby. Dotykovou metodou a bezdotykovou metodou. V této práci bylo provedeno měření drsnosti povrchu bezdotykovou metodou pomocí přístroje Alicona InfiniteFocus.

K hodnocení drsnosti povrchu se využívá stále více parametrů, aby bylo hodnocení objektivní a parametry podávaly o měřeném povrchu dostatečnou vypovídající hodnotu. Klasické hodnocení povrchu pomocí profilových parametrů drsnosti se jeví v mnoha praktických příkladech jako nedostačující. Komplexnější hodnocení drsnosti povrchu lze realizovat s využitím parametrů tzv. plošné drsnosti. Prostorovou analýzou drsnosti povrchu se otevírají nové možnosti hodnocení struktury povrchu, které byly dvourozměrným měřením nedosažitelné. Komplexnější popis vlastností povrchu je přínosný nejen pro jeho detailnější poznání, ale především rozšířením poznatků o stavu povrchu k jeho funkčnímu chování. V této diplomové práci byly měřeny jak profilové (2D) tak plošné (3D) parametry drsnosti povrchu.

1. Aktuální stav 2D a 3D měření drsnosti povrchu

Rozvoj měřicí techniky kontrolující jakost povrchu součástí je dlouhodobě zaměřen na zvyšování technické úrovně výrobků i procesů jejich zhotovování, jako je rychlost měření nebo přesnost ¹.

Rozvoj měření a hodnocení struktury povrchu vychází především z technických požadavků rozvíjející se strojírenské výroby a probíhá v souladu s výsledky normalizačního procesu v daném oboru ².

V dnešní době existuje celá řada metod pro měření 2D a 3D drsnosti povrchu. Aktuální metody pro měření 2D drsnosti povrchu jsou velice podobné jako v uplynulých letech. Pro měření 2D drsnosti povrchu se nejčastěji využívají profilometry. Pro hodnocení 2D drsnosti povrchu se nejčastěji využívá norma ČSN EN ISO 4287, kde je detailně vysvětleno, jak se vyhodnocují jednotlivé parametry drsnosti povrchu.

Hodnocení drsnosti povrchu pomocí profilových parametrů drsnosti se ukazuje do budoucna jako nedostatečné. Komplexnější hodnocení drsnosti povrchu lze realizovat přes plošné parametry drsnosti povrchu. K tomu je důležité mít příslušný měřicí přístroj. Využívání plošné drsnosti povrchu je především díky vývoji nových výrobních technologií a konstrukčních materiálů. Pro hodnocení 3D parametrů drsnosti povrchu je nejvhodnější vycházet z normy ČSN EN ISO 25178-2 ³.

Celá řada firem se zabývá problematikou měření drsnosti povrchu, mezi ty nejznámější firmy patří Taylor Hobson, Mitutoyo a Alicona. Tyto firmy se neustále snaží zlepšovat své metody a přístroje.

2. Metody snímání povrchu

V dnešní době existuje celá řada přístrojů a metod pro snímání struktury povrchu. Obecně lze metody rozdělit na metody dotykové a bezdotykové. Standardní dotykové metody pro měření struktury povrchu jsou v současnosti nahrazovány bezdotykovými metodami snímání profilu povrchu. Tento trend využívání bezdotykových metod, je především díky vývoji nových výrobních technologií a konstrukčních materiálů ⁴. V této práci je využívána pro měření bezdotyková metoda s využitím přístroje Alicona InfiniteFocus. Popis toho měřicího přístroje a princip jakým snímá povrch je popsán v samostatné kapitole.

2.1 Dotykový způsob měření

Dotykové metody se používají v tradičním strojírenském prostředí, a proto mají větší toleranci vůči znečištění. Snímacímu hrotu nevadí olejová skvrna nebo malé nečistoty, které snímací hrot odsune, kdežto optická sonda vyžaduje opravdu velice čistý měřený povrch. Existuje celá řada povrchů, které nelze dotykovým způsobem měřit ⁴.

2.1.1 Měření struktury povrchu dotykovými profilometry

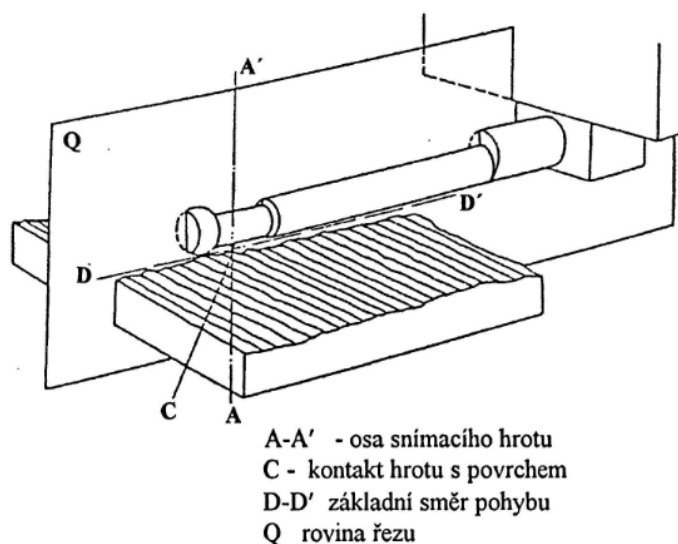
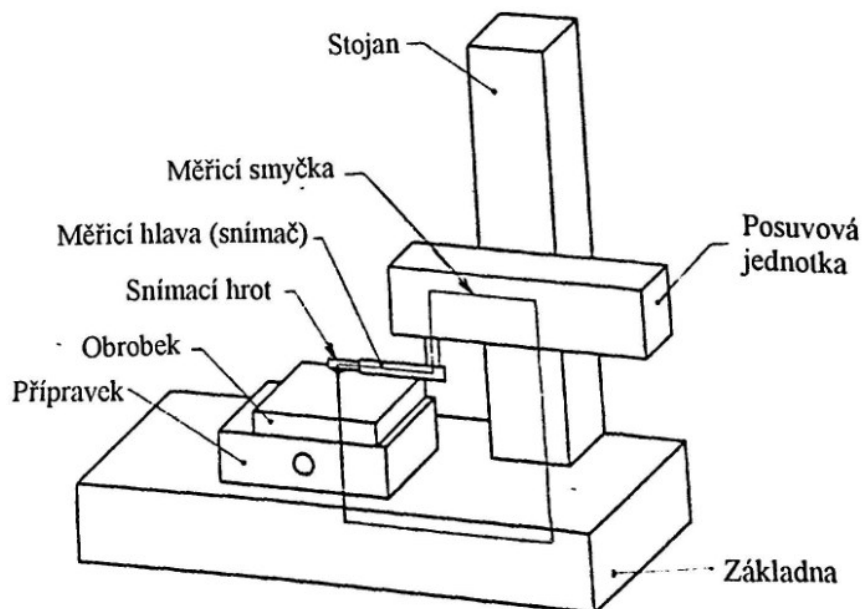
Pro praktické zjišťování hodnot drsnosti povrchu existuje celá řada metod, jedna z nejpoužívanějších je dotyková metoda, která využívá ostrého hrotu, který se v daném směru posouvá po povrchu, a díky tomu získává informace o jeho profilu. Touto metodou získáváme číselné hodnoty normalizovaných i nenormalizovaných charakteristik drsnosti povrchu. Profilové měření dotykovou metodou je předepsáno normou ČSN EN ISO 3274. Samotnou realizaci měření zabezpečuje dotykový profilometr, který se skládá z mechanické a elektrické části ⁵.

Mechanická část:

- stůl, na který se pokládá měřená součást,
- rameno se snímacím hrotem, které se pohybuje určitou konstantní rychlostí a snímací hrot snímá nerovnosti povrchu,
- přímočarý vratný pohyb je zajištěn pomocí elektromotorku nebo pneumaticky ⁶.

Elektronická část:

- transformuje mechanický signál generovaný snímacím hrotem sledujícím nerovnosti povrchu měřené plochy na elektrický signál, který se zpracovává (číselná hodnota příslušného parametru drsnosti nebo grafický záznam nerovnosti povrchu) ⁶.

Obrázek 1 Dotyková metoda ⁵Obrázek 2 Měřicí smyčka dotykového profilometru ⁵

Správnost výsledků měření ovlivňuje:

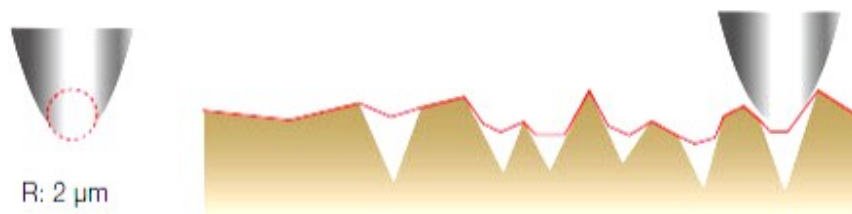
- poloměr zaoblení snímacího hrotu ($2\ \mu\text{m}$, $5\ \mu\text{m}$, $10\ \mu\text{m}$),
- vrcholový úhel snímacího hrotu (60° , 90°),
- měřicí (přítlačná) síla (cca $0,00075\ \text{N}$),
- rychlost změny měřicí síly,
- poloměr zaoblení kluzné patky snímače (u relativní metody),
- celkové geometrické uspořádání systému snímače ⁶.

Výhody dotykových metod:

- není potřeba dokonale lesklý povrch, diamantový hrot dokáže odsouvat nečistoty (olejové skvrny),
- vysoká přesnost, jednoduchost,
- přímé měření parametrů struktury povrchu,
- velká rozlišovací schopnost,
- vhodné pro kalibraci výsledků z nepřímých metod ²⁹.

Nevýhody dotykových metod:

- možnost znehodnocení kontrolovaného povrchu,
- nemožnost měřit mikronerovnost – omezení rádiusem špičky diamantového hrotu,
- možnost přichycení snímacího hrotu k měřenému adheznímu povrchu a následné poškození hrotu,
- omezený pohyb hrotu po měřeném povrchu,
- nutnost měnit hroty ²⁹.



Obrázek 3 Snímací hrot - omezení rádiusem špičky ⁷

2.2 Bezdotykové metody

Optické metody jsou považovány za vhodnou alternativu měření povrchu k měření pomocí dotykových profilometrů. Výhodou optických profilometrů je vyšší efektivnost a operativnost než u mechanických, protože dovolují nedestruktivně a bez kontaktu měřit povrchy ²⁷.

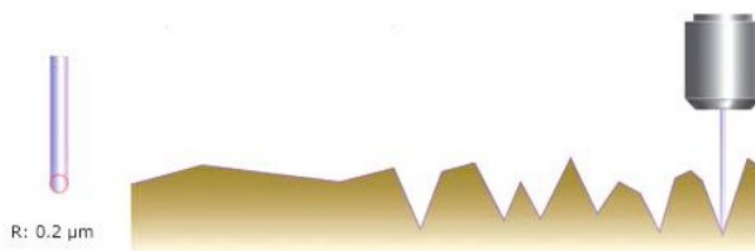
Optickými metodami hodnotíme strukturu povrchu pomocí interakce světla s nerovnostmi povrchu. Tyto metody jsou schopné kopírovat zdrsňený povrch pomocí světelného paprsku a mohou poskytnout dostatečně velký počet informací o charakteru tohoto povrchu. Bezdotykové měření slouží k měření menších ploch, podle zvětšení se mohou měřit plochy v řádech několika mm až po oblast mikronovou ⁴.

V dnešní době se mezi nepoužívanější bezkontaktní metody hodnocení povrchu řadí:

- **Optická interferometrie** (dvousvazkové či vícesvazkové, pomocí monochromatického nebo polychromatického optického záření),
- **Mikroskopické metody** (skenovací mikroskopie, holografická mikroskopie, skenovací optická mikroskopie blízkého pole),
- **Optické rozptylové metody** (založené na měření intenzity rozptýleného světla po odrazu na měřeném povrchu – používané zejména v praxi),
- **Elektronová mikroskopie** (SEM – Scanning Electron Microscopy, TEM – Transmission Electron Microscopy),
- **Senzory** (na bázi konfokálního principu při měření s polychromatickým zdrojem záření) ⁸.

Výhody bezdotykových metod:

- vysoká rychlost snímání (obousměrně),
- nedestruktivnost kontrolovaného povrchu,
- možnost měřit mikronerovnost (nejsou omezeny rádiusem špičky jako dotykové metody),
- lze měřit měkké, adhezni materiály,
- nedochází k opotřebení měřidla,
- opakovatelnost měření a okamžitost výsledků ²⁹.



Obrázek 4 Měření mikronerovnosti pomocí laseru ⁷

Nevýhody bezdotykových metod:

- možnost ztráty dat (paprsek se neodrazí zpět do detektoru správně),
- nutnost důkladného očištění kontrolovaného povrchu,
- odrazivost od měřeného povrchu (černé těleso, stříbrné těleso),
- výsledek měření ovlivněn okolním prostředím (světlo, vibrace),
- složitější interpretace výsledků,
- měření parametrů struktury povrchu je nepřímé ²⁹.

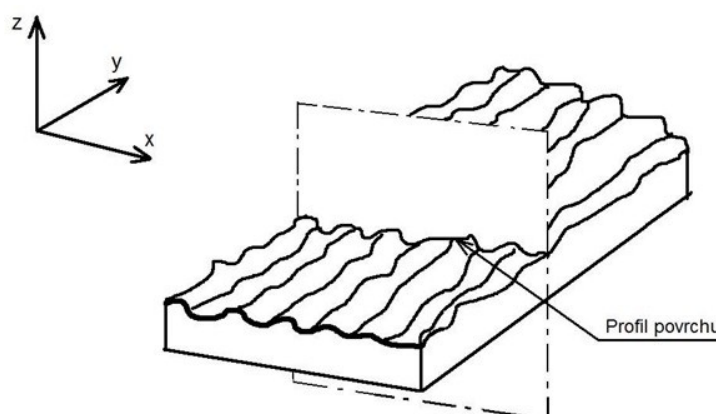
U bezdotykových měřících přístrojů funguje opačný postup zpracování dat než u dotykových měřících přístrojů, tzn., že nejprve se provede rekonstrukce snímané plochy, poté jsou po aplikaci filtračních metod vyhodnocovány požadované parametry struktury povrchu.

Důležitost bezdotykových měřících přístrojů pro metrologii již potvrdili mnohé studie, důležitost plošných metod měření nebo upřednostnění bezkontaktních metod např. z důvodu křehkosti měřeného prvku, nutnosti objemového měření nebo nestabilního povrchu odlitku²⁷.

3. Parametry profilu drsnosti

3.1 Profil povrchu

Jakákoliv technologická operace, použitá k vytvoření povrchu zanechává nerovnosti. Tyto nerovnosti mají zásadní význam pro funkci těchto ploch. Nerovnosti na povrchu tvoří prostorový útvar, který by bylo velmi složité posuzovat. Proto se tento problém řeší redukcí do roviny řezu rovinou kolmou k povrchu - viz obrázek 5. V rovině řezu se získá profil, který je základním zdrojem informací pro hodnocení struktury povrchu⁵.



Obrázek 5 Profil povrchu⁵

Základní profil

Je základem pro hodnocení parametrů základního profilu⁵.

Profil drsnosti

Je odvozen ze základního profilu. Získá se potlačením dlouhovlnných složek pomocí filtru λc . Profil je úmyslně pozměněný - viz obrázek 6. Profil drsnosti je základem pro hodnocení parametrů profilu drsnosti⁵.

Profil vlnitosti

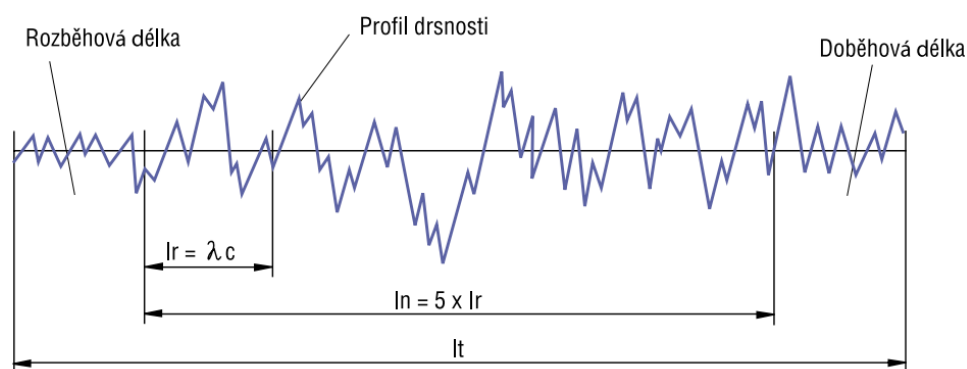
Je odvozen postupnou aplikací filtrů profilu λ_f a filtru profilu λ_c na základní profil ⁵.

Základní délka l_r

Délka ve směru osy X. Tato délka se využívá k rozpoznání nerovností, charakterizující vyhodnocovací povrch. Základní délka pro drsnost l_r je číselně rovna hodnotě vlnové délky profilového filtru λ_c - viz obrázek 6 ⁵.

Vyhodnocovaná délka l_n

Délka ve směru osy X. Tato délka se využívá pro posuzování vyhodnocovaného profilu - viz obrázek 6 ⁵.



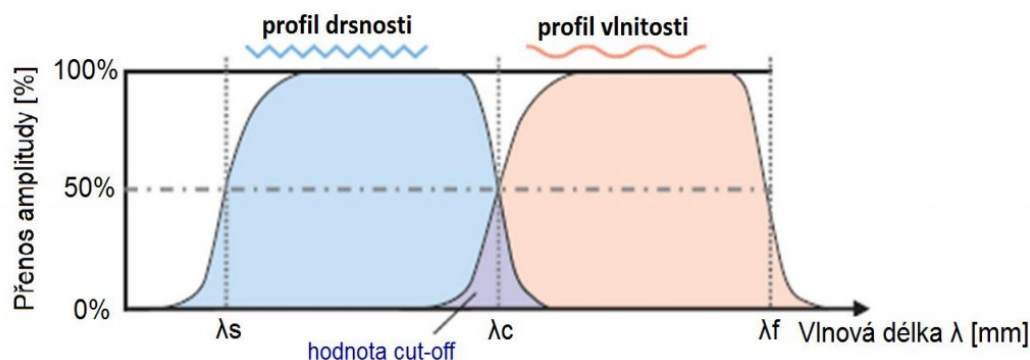
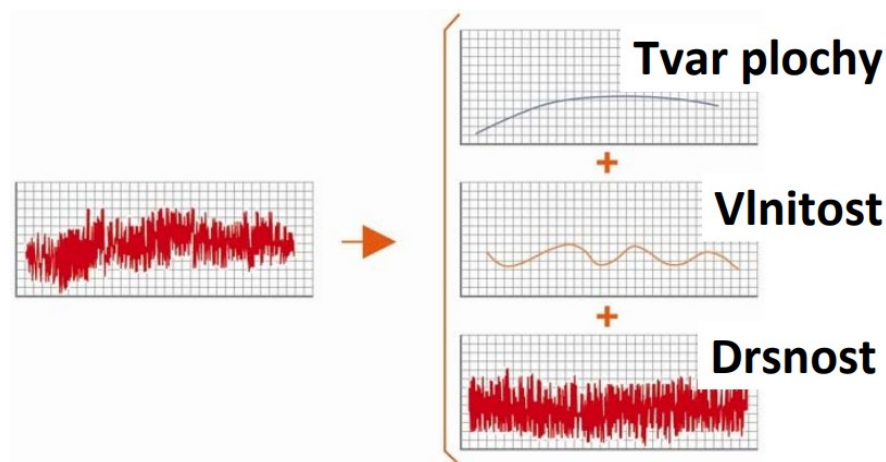
Obrázek 6 Základní délka l_r a vyhodnocovaná délka l_n ⁹

3.2 Filtr profilu

Filtr rozděluje profily na dlouhovlnné a krátkovlnné složky dle normy ČSN EN ISO 11562 ⁵.

V přístrojích pro měření drsnosti, vlnitosti a základních profilů jsou používány tři filtry, definované dle normy ČSN EN ISO 11562. Tyto filtry mají stejné přenosové charakteristiky, ale rozdílné hodnoty mezní vlnové délky cut-off ⁵.

- a) **λ_s filtr profilu:** filtr určující rozhraní mezi drsností a kratšími složkami vln přítomnými na povrchu - viz obrázek 7 ⁵.
- b) **λ_c filtr profilu:** filtr určující rozhraní mezi složkami drsnosti a vlnitostí - viz obrázek 7 ⁵.
- c) **λ_f filtr profilu:** filtr určující rozhraní mezi vlnitostí a delšími složkami vln přítomnými na povrchu - viz obrázek 7 ⁵.

Obrázek 7 Přenosová charakteristika profilových filtrů ²⁷Obrázek 8 Zpracování textury povrchu ¹²

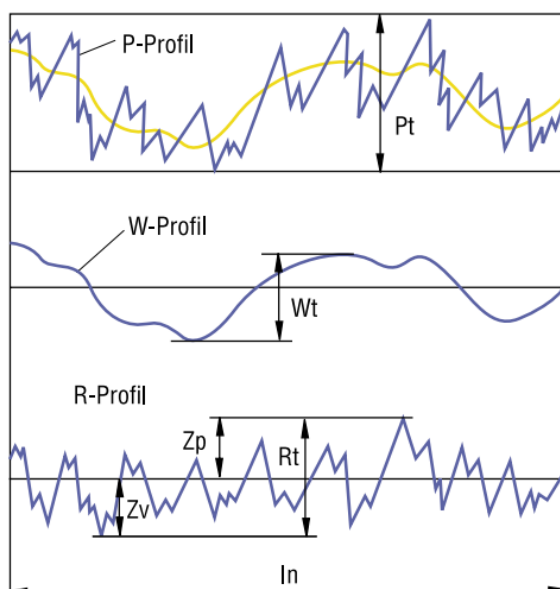
3.3 Drsnost povrchu

Drsnost povrchu lze určit jako vertikální odchylku reálného povrchu od jeho ideální hladké formy. Drsnost nelze přesně určit jedním parametrem, ale existuje celá řada parametrů, které tento pojem popisují. Jedná se o parametry popisující profily povrchu, popřípadě trojrozměrné plochy povrchu ¹⁰.

Rozdíly v drsnosti povrchu na materiálu mají velký vliv na vlastnosti povrchu jako např. velikost opotřebení, těsnění při kontaktu s jiným povrchem, tloušťku nátěrů atd. To jsou jedny z hlavních důvodů, proč se zjišťuje a vyhodnocuje drsnost povrchu ¹¹.

3.4 Základní parametry dle ČSN EN ISO 4287

Analýza struktury povrchu zahrnuje tři základní typy charakteristiky textury povrchu: drsnost (R – parametr), vlnitost (W – parametr) a základní profil (P – parametr) - viz obrázek 9 dle normy ČSN EN ISO 4287 ¹².

Obrázek 9 Geometrické parametry profilu ⁹

Tato diplomová práce se věnuje pouze parametrům R-profilu.

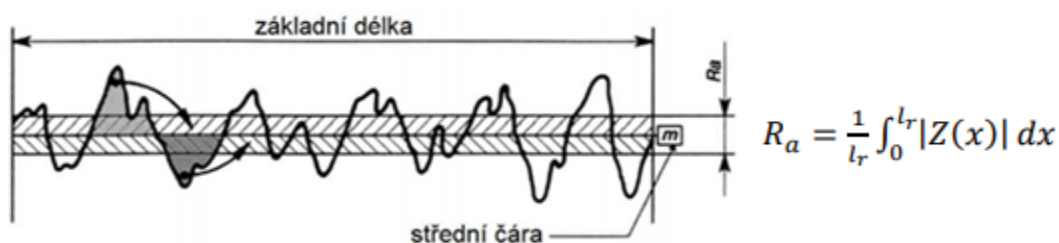
3.4.1 Výškové parametry profilu drsnosti

Výškové parametry jsou určeny pouze výškami výstupků a prohlubní nebo jejich kombinacemi, bez ohledu na jejich rozměry v horizontálním směru ¹³.

Ra - Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu

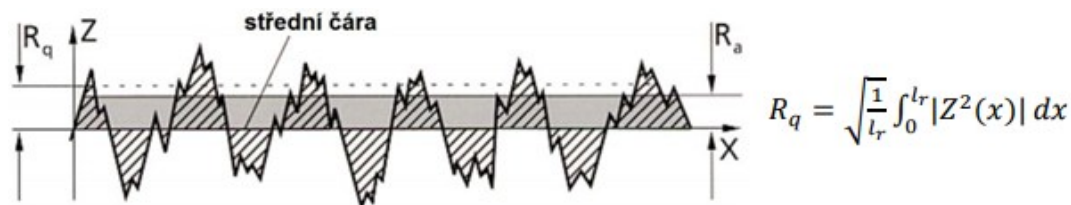
Parametr Ra je zřejmě nejpoužívanějším parametrem pro posuzování drsnosti. Tímto parametrem lze měřit i na nejjednodušších přístrojích ¹⁴.

Tento parametr přesně nevypovídá o dané drsnosti, protože Ra citlivě nereaguje na extrémní výšky a hloubky měřeného profilu. Nicméně pro srovnání ploch, které jsou vytvořeny podobnými nebo stejnými metodami a za podobných podmínek je využití tohoto parametru zcela korektní ¹³.

Obrázek 10 Znázornění parametru Ra ¹⁵

Rq - Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu

Parametr Rq je podobný jako parametr Ra, ale je citlivější na výskyt výstupků a prohlubní než parametr Ra. Použití parametru Rq je vhodné pro hodnocení jemně obrobených ploch. Porovnání parametrů Ra a Rq viz obrázek 11 ¹³.



Obrázek 11 Znázornění parametrů Rq a Ra ¹⁴

Rt - Celková výška profilu

Parametr Rt lze definovat jako součet nejvyššího výstupku a nejnižší prohlubně profilu v rozsahu vyhodnocované délky (ln). Parametr Rt je především významný u vysoce namáhaných součástí, kde velké hodnoty vzdáleností mezi výstupky a prohlubněmi představují oblasti se sklonem k poškození povrchu trhlinami. Tento výškový parametr může mít velmi proměnlivou a nestálou hodnotu. Hodnotu Rt ovlivňují i jednotlivé rýhy a výstupky profilu povrchu ¹³.

Rp - Největší výška výstupku profilu

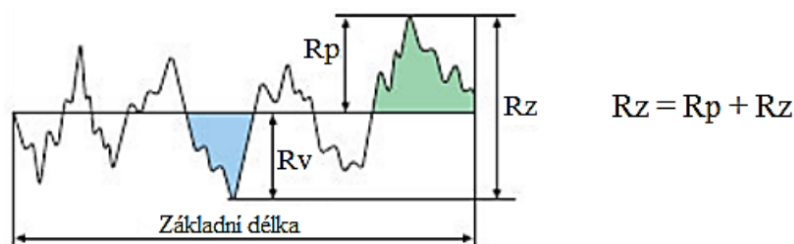
Parametr Rp určuje největší výšku výstupku, které jsou důležité pro hodnocení procesů tření a opotřebení ¹³.

Rv - Největší hloubka prohlubně profilu

Parametr Rp určuje největší hloubku prohlubně, které jsou důležité z hlediska udržení maziva na povrchu. Jsou tedy v řadě případů žádoucí, i když naopak jsou prohlubně nejčastěji místem vzniku trhlin a koroze ¹³.

Rz - Největší výška profilu

Parametr Rz je velice rozšířený. Podobný jako parametr Rt. Parametr Rt je vyhodnocovaný na vyhodnocované délce, na rozdíl od parametru Rz, který je vyhodnocovaný na základní délce. Parametr Rz je použitelný podobně jako parametr Rt, jeho hodnota je však stálější, protože není tak citlivá na rušivé vlivy na povrchu, jako jsou otřepy, prach nebo rýhy. Oproti parametrům Ra a Rq je tento parametr citlivější na změny struktury povrchu, protože jde výhradně o výškový parametr, který nevycházející z průměru ¹³.

Obrázek 12 Znáznornění parametru drsnosti R_z ²²

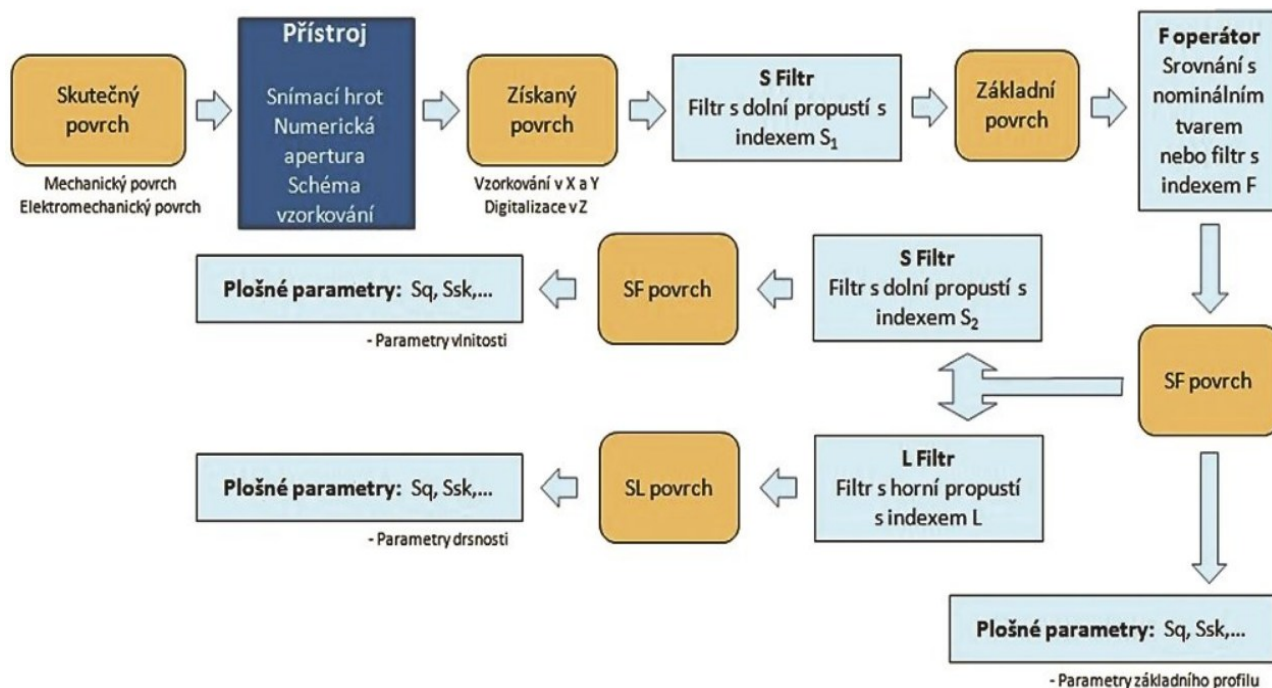
4. Plošné (3D) hodnocení textury povrchu

Plošné (3D) parametry jsou definované normou ČSN EN ISO 25178-2. Dle této normy se rozdělují na dva základní druhy plošných parametrů a to: parametr prvku a parametr pole. Tyto dva druhy jsou nejvýznamnějšími změnami v posuzování hodnocení povrchu a představují významný trend v metrologii povrchu. Podstatná část normy obsahuje definice souboru parametrů pro prostorové hodnocení textury povrchu. Každý parametr je označen symbolem a stručně charakterizován včetně určení rozsahu využitelnosti. Soubor parametrů je členěn a definován v následujících skupinách: výškové, prostorové, hybridní, funkční (objemové, fraktální) a jiné ²⁰.

Plošná charakteristika textury povrchu (3D) otevírá nové možnosti pro komplexní hodnocení struktury povrchu. Samotné měření a vyhodnocování podstatně většího počtu dat, která podrobně charakterizují prostorový profil povrchu, dávají mnohem více informací pro skutečně reálnou představu o kontrolovaném povrchu. Tyto plošné analýzy struktury povrchu přinášejí kromě číselného hodnocení i grafické zobrazení kontrolovaného profilu formou axonometrického pohledu, záznamy intenzity souřadnic nebo topografické mapy. Jednotlivé prostorové parametry textury jsou stanovovány z podstatně většího množství naměřených dat s daleko vyšší spolehlivostí, takže získaná hodnota parametru je věrohodnější. Samotná prostorová analýza přináší více informací o charakteristice povrchu plochy, např. počet, velikost a tvar rozložení výstupků a prohlubní profilu, výrazně zvyšují objektivitu hodnoceného povrchu. Tyto informace lze využít pro predikci vlastností funkčně zatíženého povrchu a jejich změn v době provozu. Takové hodnocení, mimo prostorové (3D) zobrazení, charakterizuje i menší nebezpečí zanedbání vlivu některé z důležitých funkčních vlastností povrchu ¹⁷.

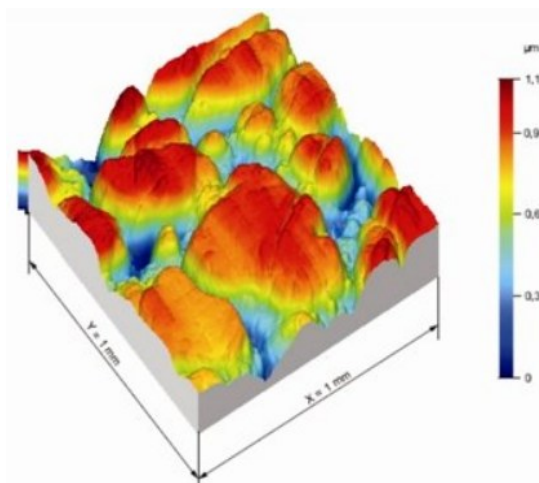
Data, z kterých hodnotíme prostorovou texturu lze získat buď měřením dotykovým přístrojem, nebo optickou technikou, která využívá snímací paprsek. Rozdíly ve výsledcích měření jsou dány především jinými způsoby snímání systémů, odlišnou přesností měření i interakcí přístrojů a kontrolovaných povrchů ¹⁸.

Díky prostorové analýze lze hodnotit strukturu povrchu novými možnostmi, které byly dvourozměrným měřením nedosažitelné. Využití tento prostorový popis nachází především pro posuzování funkčních vlastností, jako je např. tření, mazání, únavové vlastnosti, opotřebení nebo vhodnost povrchu pro nátěry ².



Obrázek 13 Schéma měření a hodnocení profilu povrchu 3D ¹⁷

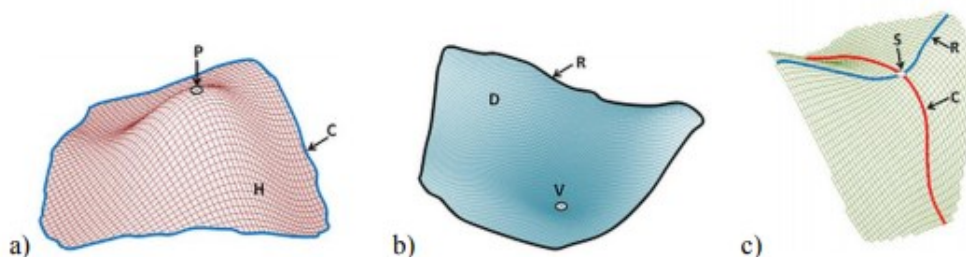
Toto schéma měření a hodnocení profilu povrchu 3D je charakterizováno v doporučení normou ČSN EN ISO 25178. Oproti označení parametrů 2D nezaznamenají podmínky filtrace – tedy P (základní), R (drsnost) nebo W (vlnitost). Pro získání plošných (3D) parametrů drsnosti nebo vlnitosti je nutné profil povrchu nejprve filtrovat potřebným filtrem (operátorem) a teprve poté lze stanovit jednotlivé hodnoty parametrů. Přitom plošné parametry jsou určeny pro celou hodnocenou plochu, kdežto 2D parametry jsou pouze průměrné hodnoty vztažené na počet základních délek ¹⁷.



Obrázek 14 Prostorové (3D) zobrazení povrchu s barevnou charakteristikou výšek nerovností povrchu ¹⁹

Tabulka 1 Definice základních topografických prvků dle normy ČSN EN ISO 25178-2 ^{20 21}

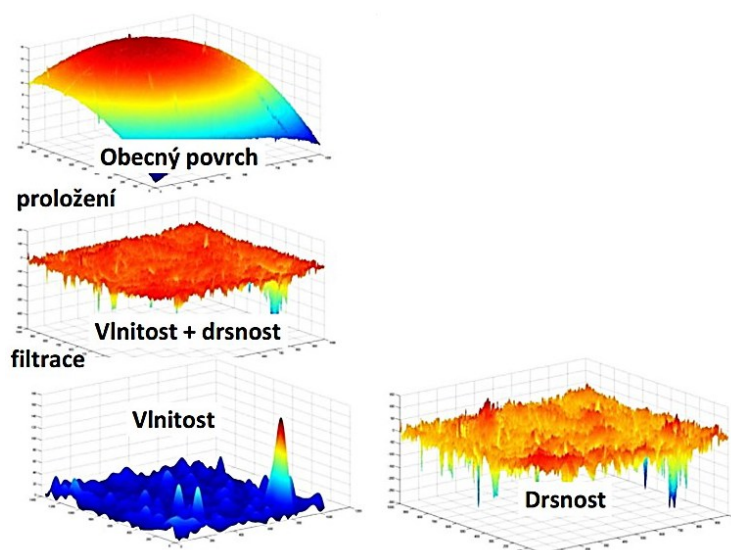
Bodové prvky	
Pik (tzv. Peak)	bod na povrchu, který je vyšší než všechny ostatní body
Prohlubeň (tzv. Pit)	nejnižší bod na povrchu, který je nižší než všechny
Bod sedla (tzv. Saddle point)	jeden bod příslušného sedla
Čárové prvky	
Přímka kurzu (tzv. Course line)	křivka oddělující přilehlé vrchy
Hřebenová přímka (tzv. Ridge line)	křivka oddělující přilehlá údolí
Plošné prvky	
Vrch (tzv. Hill)	oblast okolo piku taková, že směr všech maximálních cest končí v piku
Údolí (tzv. Dale)	oblast okolo prohlubně taková, že směr všech maximálních cest končí v prohlubni
Množina bodů	
Sedlo (tzv. Saddle)	sada bodů na povrchu omezeném stupnicí, kde se kříží hřebenové přímky a přímky kurzu



Obrázek 15 Topografické znázornění okolí: a) vrcholu, b) prolákliny, c) sedla ²³

4.1 Filtrace povrchu

Obrobený povrch je souborem nerovností, které vytvářejí strukturu povrchu. Filtrováním dosáhneme separaci jednotlivých složek struktury povrchu. Při analýze textury povrchu pomocí normovaných plošných (3D) parametrů je podstatné správně vybrat nastavení filtrů. Na uvedeném obrázku 16 je vykreslen postup filtrace pro získání plošných (3D) parametrů textury povrchu ²⁹.



Obrázek 16 Filtrace ¹²

Na hodnocený povrch je nejprve použit Gaussův filtr, ten z povrchu vyřadí prvky s velice krátkou prostorovou vlnovou délkou (dále jako tzv. S-filtr). Stejně jako u profilového měření tak i v plošném měření se neuvažují prvky jako trhliny, korozní mikrotrhliny, rýhy apod. nebo prvky vzniklé rušivým elektrickým signálem. Po aplikaci S-filtru vznikne tzv. primární povrch ²⁸.

Poté je na primární povrch použita matematická operace, která pomocí metody nejmenších čtverců odstraní vliv tvaru z primárního povrchu (dále jen jako F-operace). Po použití S-filtru a F-operace vznikne S-F povrch ²⁸.

Poté se na S-F povrch aplikuje Gaussův L-filtr, který z povrchu vyloučí prvky s dlouhou prostorovou vlnovou délkou. Tím vznikne S-L povrch ²⁸.

S-filtr

Je definován jako filtr povrchu, který vede k odstranění malé laterální stupnice z povrchu, což vede k dosažení primárního povrchu ²⁰.

L-filtr

Je definován jako filtr povrchu, který vede k odstranění velké laterální stupnice z primárního nebo S-F povrchu ²⁰.

F-operace

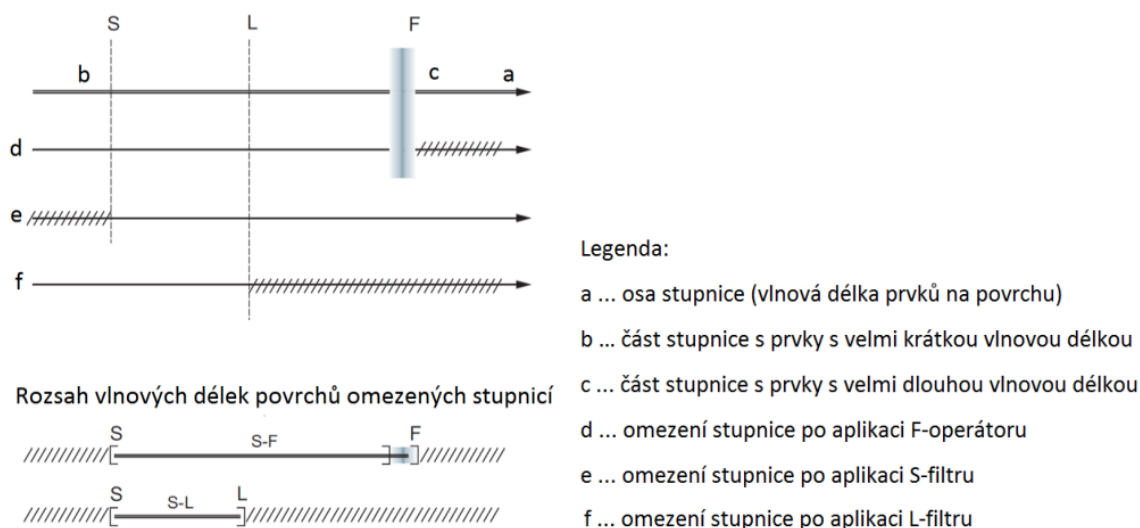
Je definován jako operace, která vyřadí vliv tvaru z primárního povrchu ²⁰.

S-F povrch

Je definován jako povrch, který je odvozený z primárního povrchu, a to pomocí vyloučení vlivu tvaru využitím F-operace ²⁰.

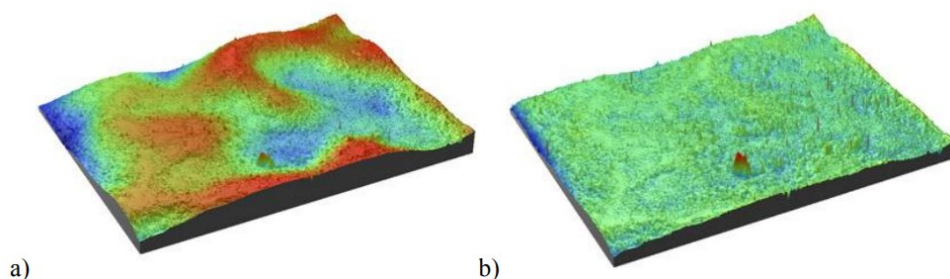
S-L povrch

Je definován jako povrch, který je odvozený od povrchu S-F vyloučením vlivu velké stupnice při použití L-filtru ²⁰.



Obrázek 17 Vztahy mezi S-filtrem, L-filtrem, F-operací a S-F a S-L povrchy ²⁰

Povrchy S-F a S-L nazýváme povrchy omezené stupnicí (tzv. scale-limited surfaces).



Obrázek 18 Použití F i S filtru a) prvotní povrch, b) S-L povrch ²⁵

4.2 Parametry pole

Dle Normy ČSN EN ISO 25178-2 jsou rozdělovány parametry pole na výškové, prostorové (obdoba s délkovými), hybridní a funkční. Rozdělení parametrů pole lze provést do skupiny parametrů, založené na analýze objemu (V) a plochy (S). Ačkoli některé V-parametry mají značku S, jsou řazeny mezi V-parametry. Je to především kvůli tomu, že jde o plošnou charakteristiku vyhodnocovanou podle objemu materiálu ²⁰.

4.2.1 S-Parametry

S-Parametry pole jsou z velké části odvozeny z profilových parametrů, které jsou definovány dle normy ČSN EN ISO 4287. Plošné parametry drsnosti povrchu jsou definovány dle normy ČSN EN ISO 25178-2. Skupina S-parametrů obsahuje 12 parametrů, výškových, prostorových, hybridních a pomocných ²⁰.

Sq - Základ průměrné výšky čtvercem omezené stupnice povrchu

Root mean square height of the scale-limited surface

Je definován jako vymezení průměrné hodnoty čtverce hodnot koordinace uvnitř plochy ^{20 21}.

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A z^2(x,y) dx dy}$$

Sa - Aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu

Arithmetical mean height of the scale-limited surface

Je definován jako aritmetický průměr absolutních hodnot koordinace uvnitř stanovené plochy (A) ^{20 21}.

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |z(x,y)| dx dy$$

Uplatnění výškových parametrů je velmi podobné jako u profilových parametrů. Parametry Sq a Sa představují průměrnou kvadratickou a průměrnou aritmetickou míru výškových souřadnic textur hodnoceného povrchu. Oba parametry nejsou citlivé při rozlišování údolí a vrchů, jejich rozdílné hodnoty nedávají konečnou představu o vlastnostech a charakteru hodnoceného povrchu. Charakteristické uplatnění parametru Sa je na obrobené povrchy, kdežto parametr Sq na optické plochy, které potřebují větší přesnost ^{18 26}.

Sz - Maximální výška omezené stupnice povrchu

Maximum height of the scale-limited surface

Je definován jako součet maximální hodnoty výšky piku S_p a maximální hodnoty hloubky prohlubně uvnitř stanovené plochy^{20 21}.

Sp - Maximální výška piku (vrcholu) omezené stupnice povrchu

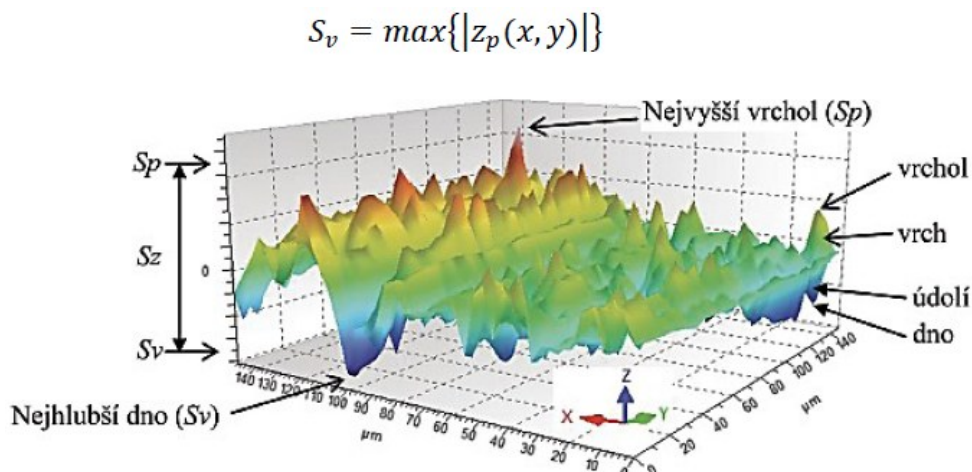
Maximum peak height of the scale limited surface

Je definován jako největší hodnota výšky piku (vrcholu) uvnitř stanovené plochy^{20 21}.

Sv - Maximální hloubka prohlubně omezené stupnice povrchu

Maximum peak height of the scale limited surface

Je definován jako hloubka prohlubně uvnitř stanovené plochy, která je zmenšená o její nejmenší hodnotu^{20 21}.



Obrázek 19 Grafické znázornění plošných parametrů²⁶

S_p , S_v a S_z jsou parametry, jejichž hodnoty upřesňují absolutně nejvyšší a nejnižší body textury hodnoceného povrchu. Parametr S_p vyjadřuje vzdálenost v mikrometrech mezi nejvyšším vrcholem povrchu a střední rovinou – vztah (1), kde $z_p(x, y)$ je výšková souřadnice vrcholu měřené plochy. Stejně tak parametr S_v reprezentuje vzdálenost v mikrometrech mezi nejhlubším bodem (dnem) posuzované plochy a střední rovinou – vztah (2), kde $z_v(x, y)$ je výšková souřadnice dna měřené plochy. Parametr S_z reprezentuje maximální výšku měřené plochy, S_z je vzdálenost mezi nejvyšším vrcholem a nejhlubším dnem – viz vztah (3). Tyto tři parametry vycházejí z jednotlivých (bodových) maximálních hodnot a ne z celého měřeného povrchu jako celku^{18 26}.

1. $S_p = \max \{z_p(x, y)\} \quad [\mu\text{m}]$
2. $S_v = \max \{|z_v(x, y)|\} \quad [\mu\text{m}]$
3. $S_z = S_p + S_v \quad [\mu\text{m}]$

Obrázek 20 Vztahy mezi výškovými parametry 3D drsnosti povrchu ²⁶

Ssk - Šikmost omezené stupnice povrchu

Skewness of the scale-limited surface

Šikmost je definována jako kvocient průměrné hodnoty koordinační krychle a hodnot krychle S_q ^{20 21}.

$$S_{sk} = \frac{1}{S_q^3} \left[\frac{1}{A} \iint_A z^3(x, y) dx dy \right]$$

Parametr Ssk vyjadřuje míru symetrie hodnot výšky $z(x, y)$ od střední roviny. Kladné znaménko představuje převahu výšek vrchů nad hloubkami údolí. Záporné znaménko značí přítomnost výrazných údolí. Šikmost se využívá převážně pro analýzu opotřebení ploch ^{18 26}.

Sku - Špičatost omezené stupnice povrchu

Kurtosis of the scale-limited surface

Špičatost je definována jako kvocient průměrné hodnoty koordinace a hodnoty čtvrté mocniny S_q uvnitř stanovené plochy (A) ^{20 21}.

$$S_{ku} = \frac{1}{S_q^4} \left[\frac{1}{A} \iint_A z^4(x, y) dx dy \right]$$

Parametr Sku vyjadřuje specifickou míru srovnávající stupeň koncentrace hodnot výškových souřadnic bodů povrchu prostřední velikosti se stupněm „nahuštěnosti“ ostatních hodnot. Špičatost se používá k zjišťování velkých výškových rozdílů mezi vrcholy a dny údolí ^{18 26}.

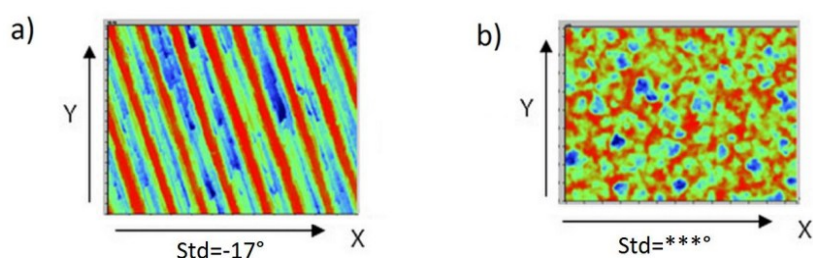
Tabulka 2 Přehled S-parametrů^{20 21}

Prostorové parametry	
Sal	Délka autokorelace / Autocorrelation length
Str	Poměr aspektu textury / Texture aspect ration
Hybridní parametry	
Sdq	Základ průměrného čtverce gradientu omezené / Root mean square gradient of the scale-limited surface stupnicí povrchu
Sdr	Poměr rozvinuté mezifázové plochy omezené stupnicí povrchu / Developed interfacial areal ratio of the scale-limited surface
Pomocné parametry	
Std	Směr textury omezené stupnice povrchu / Texture direction of the scale-limited surface

Mezi prostorové parametry patří parametr Sal a Str. První z nich Sal vyjadřuje délku, která odpovídá nejrychlejšímu poklesu autokorelační funkce na úroveň 20 % v libovolném směru. Tím je stanovena nejdůležitější délka křivky. Poměr aspektu textury Str, který představuje popis řezu centrálním vrcholem. Vyjadřuje vztah mezi maximální a minimální vzdáleností okraje řezu od středu centrálního vrcholu. Parametr Str nabývá hodnot 0 až 1 nebo může být vyjádřen v procentech. Parametr Str slouží především k analýze izotropie profilu povrchu, vyjadřuje míru nezávislosti vlastností povrchu na směru prováděného měření^{18 26}.

Hybridní parametry jsou dva a to Sdq a Sdr. Parametr Sdq - vyjadřuje průměrný kvadratický sklon povrchu a je obdobný s Rdq ze souboru 2D. Parametr Sdr představuje poměr rozvinuté plochy povrchu k nominální ploše měřeného povrchu. Parametr Sdr je ukazatelem velikosti deformace částí hodnoceného povrchu^{18 26}.

Pomocným parametr Std určuje důležité směry textury povrchu. Parametr Std je vyjádřený v úhlech, tento úhel směru struktury povrchu, je měřený od osy Y; a je získán ze spektra úhlů. Tento parametr se používá hlavně pro těsnící plochy, tak aby nedošlo k nevhodné orientaci textury povrchu a tím k nesprávné funkci těsnícího spoje^{18 26}.



Obrázek 21 Příklad použití parametru Std a) orientovaná, b) neorientovaná plocha²⁵

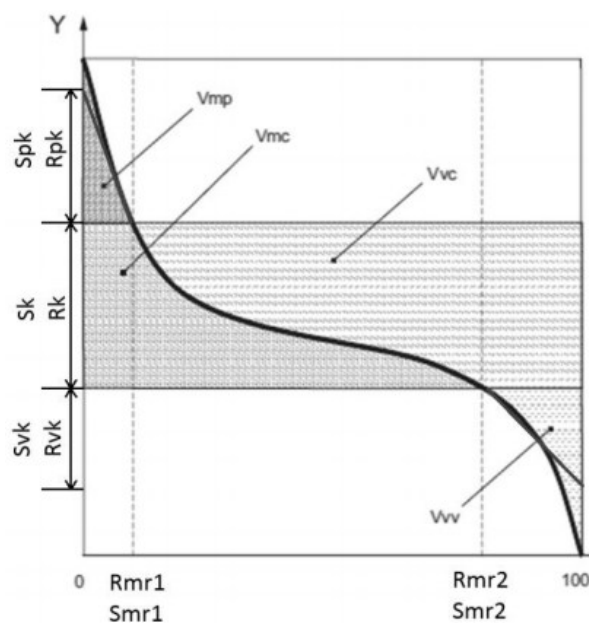
4.2.2 V-Parametry

V-parametry se řadí do skupiny objemových parametrů a umožňují hodnotit funkční topografické prvky plochy, využívají k tomu analýzy objemu povrchu omezeného stupnicí. Přehled všech V-parametrů je znázorněn v tabulce 3 ²⁸.

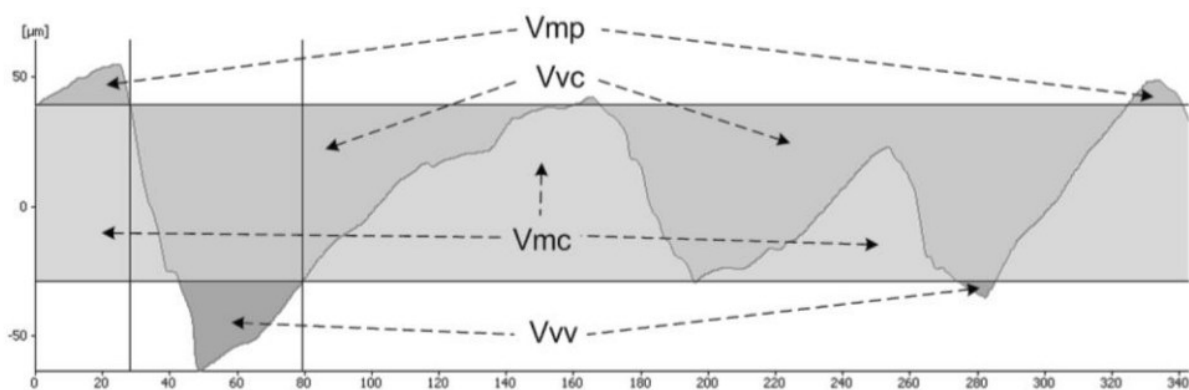
Tabulka 3 Přehled V-parametrů ^{20 21}

Funkční parametry	
Sk	Výška jádra / Core height
Spk	Redukovaná výška piku / Reduced peak height
Svk	Redukovaná hloubka údolí / Reduced dale height
Smr1	Poměr materiálu / Material ratio
Smr2	Poměr materiálu / Material ratio
Spq	Základ průměrné úchylky čtverců plošiny / Plateau root mean square deviation
Svq	Základ průměrné úchylky čtverců údolí / Dale root mean square deviation
Smq	Poměr materiálu / Material ratio
Parametry neplatného objemu / Void volume parameters	
V _{vv}	Neplatný objem údolí omezené stupnice povrchu / Dale void volume of the scale-limited surface
V _{vc}	Neplatný objem jádra omezené stupnice povrchu / Core void volume of the scale-limited surface
Parametry objemu materiálu / Material volume parameters	
V _{mp}	Pik objemu materiálu omezené stupnicí povrchu / Peak material volume of the scale-limited surface
V _{mc}	Jádro objemu materiálu omezené stupnicí povrchu / Core material volume of the scale-limited surface
Parametry objemu materiálu / Material volume parameters	
S _{xp}	Extrémní výška piku / Peak extreme height

Funkční parametry, jsou odvozeny z charakteristiky křivky materiálového poměru profilu povrchu (Abbottova-Firestoneova křivka). Na základě normy ČSN EN ISO 13565-2 je definovaná křivka s parametry Sk, Sv_k, Sp_k, Smr₁ a Smr₂, stejným výpočetním principem jako pro soubor parametrů R_k. Tyto parametry představují plochu materiálu na dané výškové úrovni. Zvláštní podskupinu tvoří parametry charakterizující objemové vztahy odvozené z uvedené křivky, tzn. objemy materiálu a nezaplněných prostorů. Funkční parametry především vyjadřují funkční aspekty povrchu, hlavně opotřebení a mazání. Díky těmto parametrům získáme důležité informace o schopnosti povrchu udržet mazací médium nebo umožní predikci životnosti funkčního povrchu z hlediska opotřebení ^{18 19}.



Obrázek 22 Křivka nosného podílu pro objemové parametry ^{20 21}



Obrázek 23 Souvislosti objemových parametrů křivky nosného podílu s povrchem ²⁷

Objemová skupina parametrů je velice významná, protože poskytuje skutečné informace o konkrétním množství maziva, který je povrch schopen zachytit, nebo materiálu, který lze opotřebením odstranit tak aby se zachovala funkčnost plochy ¹⁹.

5. Třískové obrábění vstříkovacích forem

Současný trend v oblasti výroby vstříkovacích forem si žádá stále větší zkracování výrobních časů a snižování nákladů na výrobu což vede k vývoji nových nástrojů, frézovacích strategií a použití moderních frézovacích center, která umožňují obrábět i složité tvarové díly. Jde především o co největší úběr materiálu v co nejkratším čase. Při obrábění se používají procesní kapaliny, které zlepšují celý proces obrábění ³⁰.

5.1 Strategie frézování dutin vstříkovacích forem

Při obrábění tvarových ploch vstříkovacích forem, většinou ve tvaru dutin, se v největší míře používá frézování. Spolu s vývojem moderních víceosých frézovacích center, upínacích systémů a nástrojů je kladen velký důraz na rozvoj frézovacích strategií. Nové strategie společně s vhodnou volbou řezných podmínek, které jsou dány výrobcem frézovacího nástroje, značně zkracují časy a snižují náklady na výrobu. Umožňují dosáhnout velmi dobrých geometrických i jakostních vlastností obrobeného povrchu. Kvalitní CAD/CAM systémy usnadňují konstruktérům a technologům práci při modelování tvarových částí forem, následně při generování drah obráběcího nástroje a vytváření NC kodů ³⁰.

5.2 Jakost povrchů součástí forem

U vyráběných dílů forem je dána přesnost a jakost povrchu výrobním výkresem a technologickým postupem. Jednotlivé výrobní způsoby umožňují dosáhnout jen určitých hodnot jakosti povrchu. Jednotlivé součásti formy i jejich celky pak vyžadují takový způsob opracování a dodržení přesnosti, aby vyhověl požadované funkci ³¹.

Od jakosti povrchů forem se také odvíjí odformovatelnost hotového výrobku, s vyšší drsností je obtížnější vyhodit výrobek z formy. Doporučené drsnosti povrchů dutiny formy se nachází v obrázku 24 ³¹.

Drsnost R_a	Obrobená a požadovaná jakost ploch
0,05	nejpřesnější tvárnice a tvárníky s opracováním na vysoký lesk
0,1	tvárnice a tvárníky s opracováním na běžný lesk
0,2	tvárnice a tvárníky s dokonalým povrchem
0,4	tvárnice a tvárníky s matným povrchem opracování dosedacích ploch
0,8	opracování tvárníků a tvárníc u běžných forem a u dosedacích ploch
1,6	opracování tvárníků a tvárníc méně náročných forem a dosedacích ploch

Obrázek 24 Přehled doporučených drsností povrchu pro dutiny formy ³¹

5.3 Vliv drsnosti povrchů na plnění dutiny formy

Právě plnění dutiny formy je nejdůležitější částí celého vstřikovacího cyklu. Plnění formy se odehrává ve velmi krátkém čase. V tomto čase musí polymerní tavenina vyplnit všechny místa formy. Proto velmi závisí na tom, aby byly pochopeny všechny zákonitosti zatékavosti polymeru ³².

V dnešní době zažité postupy výroby finálních povrchů vstřikovací forem, které přicházejí do kontaktu se vstřikovaným materiálem, si vyžadují vysokou kvalitu povrchu (zpravidla leštění). Tato finančně a časově velmi náročná dokončovací operace má v mnoha případech své opodstatnění. Např. je-li na konečném výrobku, požadován povrch s vysokou kvalitou kvůli funkčním nebo dekorativním důvodům. Nicméně existuje mnoho případů, kdy nejsou na tyto povrchy kladeny vysoké požadavky, a přesto jsou kvůli zažité představě lépe tekoucího materiálu po lepším povrchu používány drahé dokončovací operace.

Při vstřikování materiálů do dutiny formy s různými povrchy je známo, že nedokonalá jakost povrchu nemá negativní vliv na délku zatečení. Naopak v celé řadě případů na horším povrchu formy zatékají polymerní materiály lépe. Výše uvedené informace mají pozitivní dopad především na náklady spojené s výrobou dutin vstřikovacích forem, kdy nebude nutné v opodstatněných případech používat nákladné způsoby výroby. Dojde k nemalé časové úspoře, protože tyto dokončovací operace jsou časově velmi náročné ³³.

Využití uvedených poznatků znamená zejména výrobu méně náročnějšími způsoby obrábění, např. frézováním, bez využití ekonomicky velmi náročných dokončovacích operací.

Z výše uvedených informací je patrné že není potřeba formy obrábět dokončovacími operacemi pro dosažení dokonalé drsnosti povrchu, avšak postačí klasické frézování. Kde použitím vhodných náklonů a řezných podmínek dosáhneme, dostačující drsnosti povrchu.

6. Experimentální část

Cílem experimentální části je zjistit o jaký úhel je nejefektivnější nástroj naklonit pro dosažení nejnižších hodnot posuzovaných parametrů drsnosti povrchu.

Měření drsnosti povrchu bylo prováděno na tří-dimenzionálním mikroskopu Alicona InfiniteFocus, který vlastní Katedra obrábění a strojírenské metrologie.

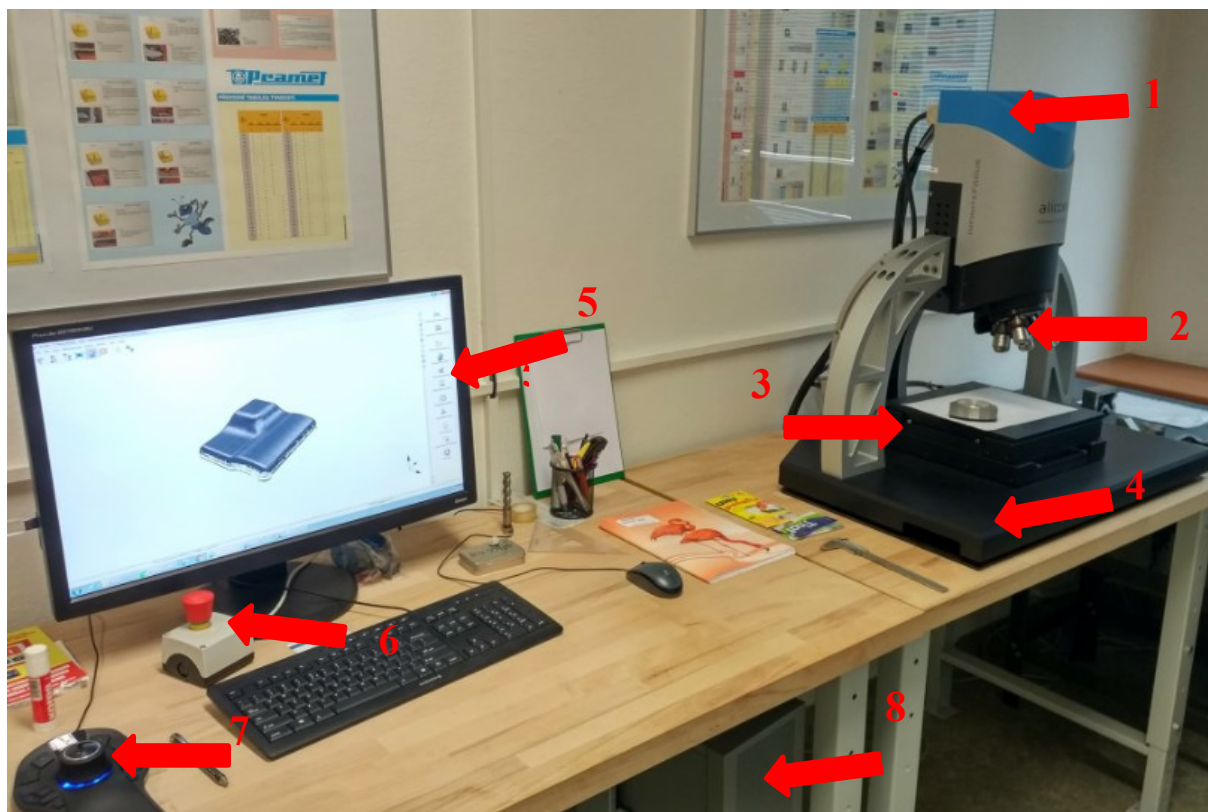
6.1 Popis měřicího přístroje Alicona IF

Měření drsnosti povrchu se provádělo pomocí 3D optického mikroskopu Alicona InfiniteFocus. Jak už z názvu plyne, jedná se o optický měřicí přístroj, který umožňuje zmapovat topografii povrchu. Jedná se o bezkontaktní metodu, optickou, která je založena na změně zaostření.

Měřicí přístroj je vysoce přesný, flexibilní a rychlý 3D měřicí přístroj. Hlavní výhodou zařízení je integrované měření drsnosti a tvaru jak ve 2D, tak i ve 3D, čímž je docílena funkcionality několika podobných měřicích zařízení. Rozsah měřitelných povrchů je téměř neomezený. Výstupem z měření jsou velice přehledné a názorné protokoly ³⁴.

Přístroj je především určen pro kontrolu velmi malých součástí a mikrostruktury povrchu. Využití tento přístroj nachází především ve výrobě forem a nástrojů a při kontrole břitů nástrojů. Při optimalizaci výroby a materiálu je Alicona IF nejvíce přínosná ve výrobě součástí velmi malých rozměrů, součástí automobilů, lékařských přístrojů, vstřikovacích forem, elektronickém a leteckém průmyslu. Tento přístroj pro měření představuje světový standard zabezpečování jakosti ³⁴.

Na příslušném obrázku lze vidět konkrétní pracoviště s bezdotykovým měřením, kde jsou jednotlivé komponenty popsány.



Obrázek 25 Pracoviště se zařízením Alicona InfiniteFocus

Popis jednotlivých částí:

1 – Svislá posuvová jednotka,

5 – Zobrazovací jednotky (monitor),

2 – Otočná hlava s objektivy,

6 – Bezpečnostní tlačítko (stop),

3 – Zobrazovací jednotky (monitor),

7 – Ovladač,

4 – Základna,

8 – Vyhodnocovací počítač, zdroj.

Svislá posuvová jednotka

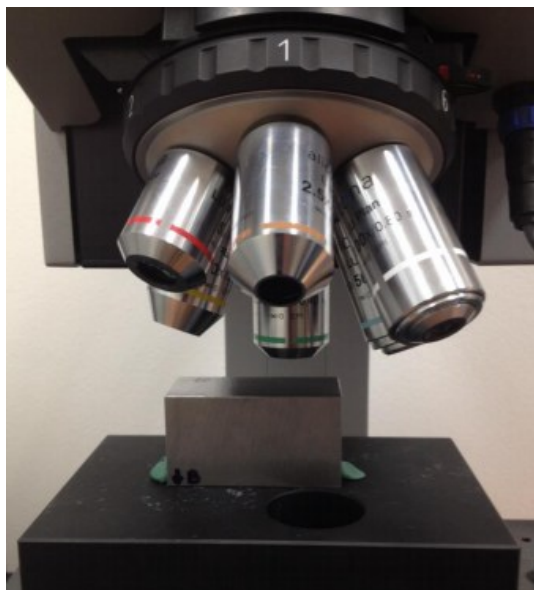
Jde o komponent, ke kterému je uchycena otočná hlava s objektivy. Svislá posuvová jednotka umožňuje přiblížení a oddálení od vzorku a tím i nastavení hloubky ostrosti měřeného povrchu.

Otočná hlava s objektivy

Celkem šest objektivů je upevněno na otočné hlavě a každý objektiv má různé přiblížení k měřenému povrchu. Při měření se využívá pouze jednoho objektivu.

2,5x	5x	10x	20x	50x	100x
8.8mm	23.5mm	17.5mm	13.0mm	10.1mm	3.5mm

Obrázek 26 Rozlišení jednotlivých objektivů

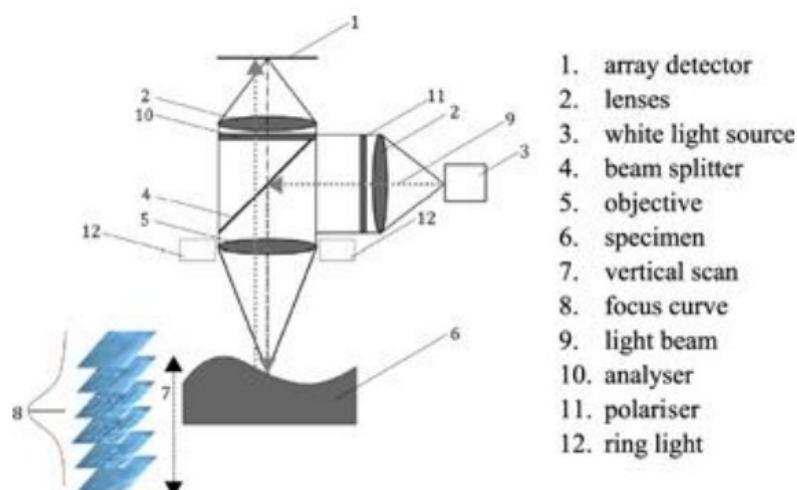


Obrázek 27 Otočná hlava s objektivy

6.2 Princip měření Alicony IF

Jak už bylo zmíněno, jedná se o bezkontaktní metodu, optickou, která je založena na změně zaostření.

Princip měření je založen na skenování objektu objektivem s velmi malou hloubkou ostrosti a postupnou změnou zaostřené vzdálenosti tzv. variace ostření, v průmyslu též známé pod pojmem „Focus Variation“. Příslušný software z nasnímaných 2D obrazů následně složí přesný 3D obraz měřeného předmětu a měření se provádí přímo na tomto obrazu. Tato metoda měření je v současnosti jedna z nejpoužívanějších ve strojírenství. Kvalitu naskenovaného povrchu ovlivňuje především správně nastavené osvětlení. Důležité je také správně zvolit objektiv, kterým se povrch skenuje. Tak to naskenovaný povrch má vysokou kvalitu a vysoké rozlišení ³⁷.



Obrázek 28 Schéma měření pomocí metody „Focus Variation“³⁵

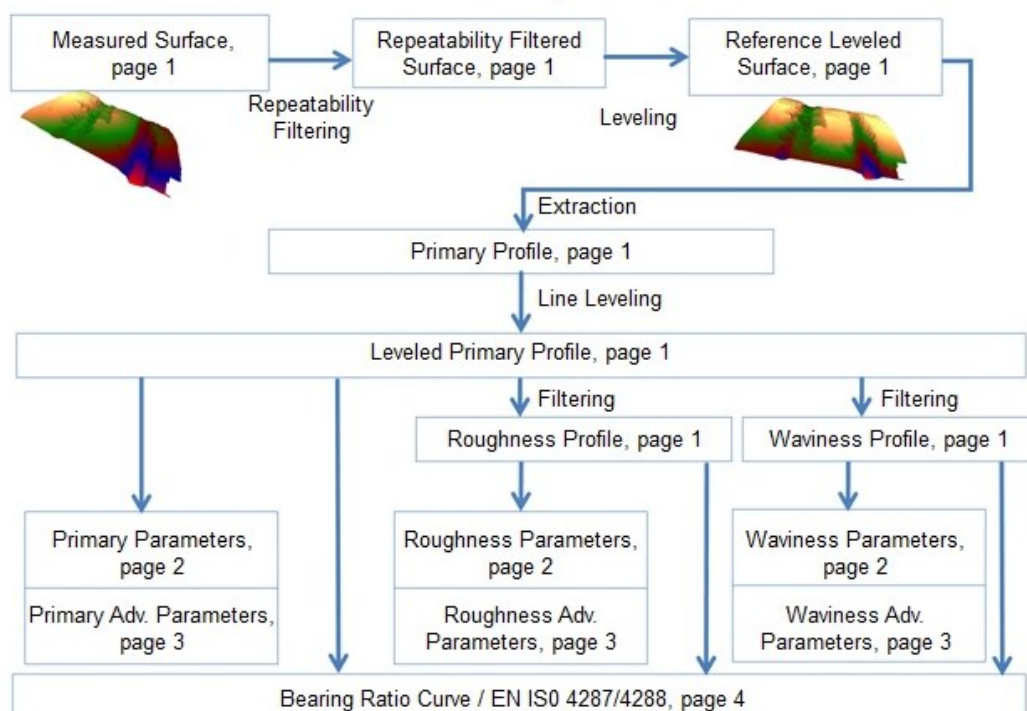
Popis jednotlivých částí:

- | | |
|--------------------------|---------------------------|
| 1 – Maticový detektor, | 7 – Vertikální skenování, |
| 2 – Čočka, | 8 – Zaměřená křivka, |
| 3 – Zdroj bílého světla, | 9 – Paprsek světla, |
| 4 – Dělič, | 10 – Analyzátor, |
| 5 – Objektiv, | 11 – Polarizér, |
| 6 – Měřený vzorek, | 12 – Světelný prstenec. |

6.3 Software Alicona InfiniteFocus

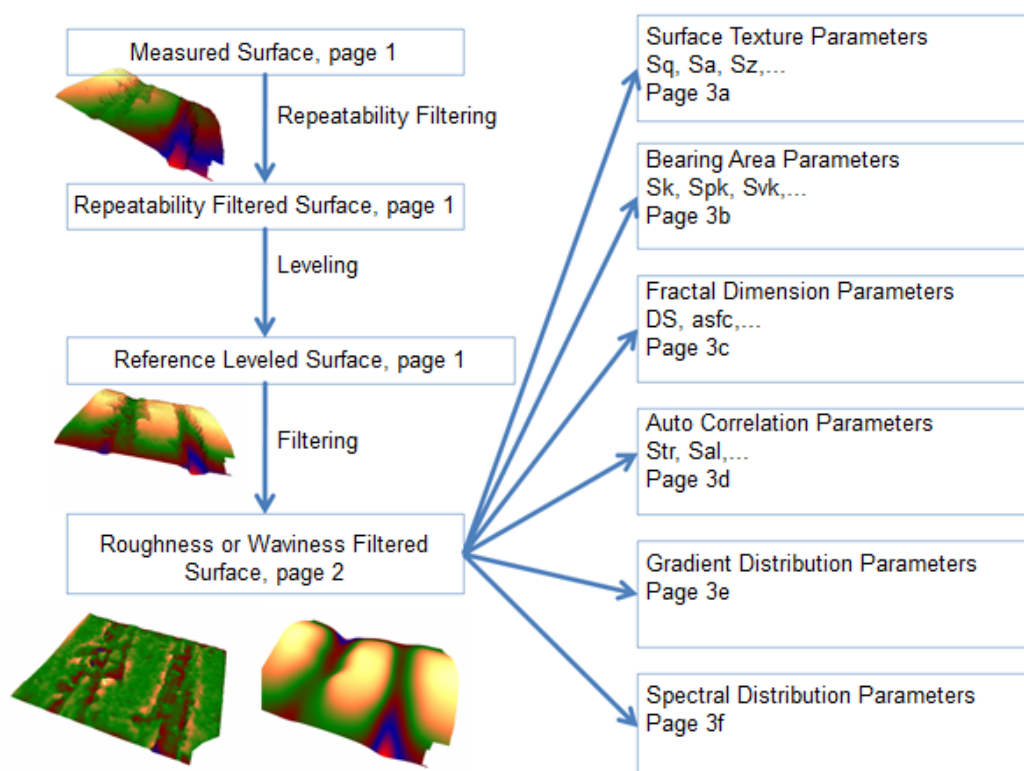
SW ve kterém se měření provádí, se jmenuje IF-Laboratory Measurement a je dodáván přímo od výrobce. Zařízení pracuje v prostředí Windows. V daném sw lze vyhodnocovat plošnou a profilovou drsnost, vlnitost a další parametry. Při zakoupení přídatného modulu lze měřit a vyhodnocovat nejen obrobené vzorky, ale také řezné nástroje (vrtáky, frézy, vyměnitelné břitové destičky) a vyhodnocovat např. jejich opotřebení. SW je velice dobře zpracovaný a práce v něm je intuitivní. Při vyhodnocování dat, si sám operátor zvolí, co chce měřit a podle toho si zvolí příslušné funkce. SW Alicona IF nabízí širokou škálu měření parametrů drsnosti a dalších atributů. Při práci není nutné vytvářet vlastní protokoly či tabulky o měření. Výstupem z měření jsou velice přehledné protokoly o měření, popřípadě tabulky, grafy a obrázky z měření.

Workflow of Profile Roughness Measurement



Obrázek 29 Pracovní schéma SW Alicona pro vyhodnocení profilové drsnosti

Workflow of Surface Texture Measurement

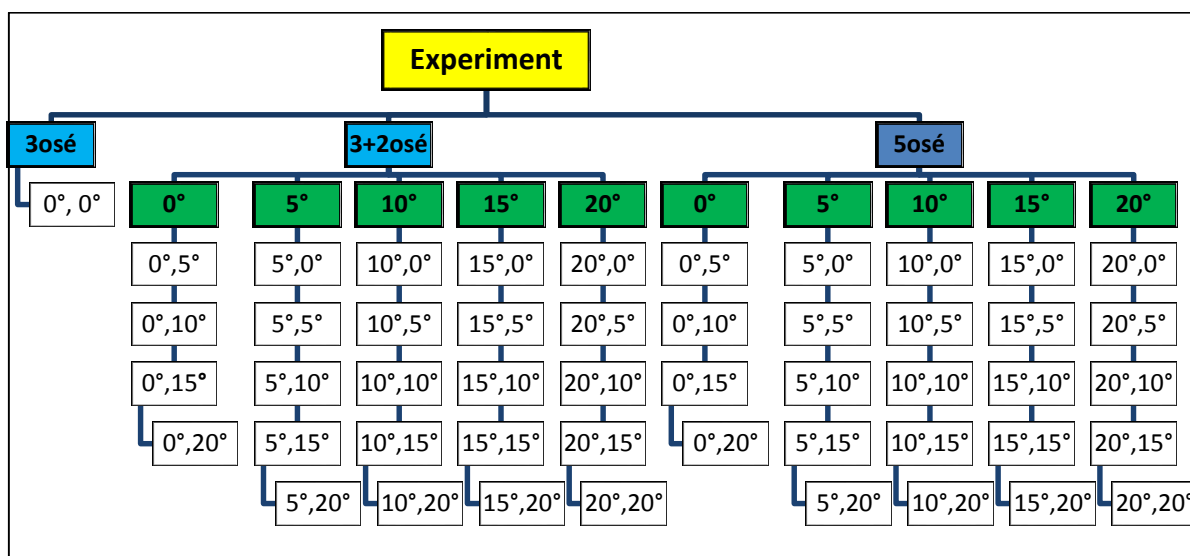


Obrázek 30 Pracovní schéma SW Alicona pro vyhodnocení struktury povrchu

7. Rozbor parametrů drsnosti povrchu po 3osém, 3+2osém a 5osém frézování

7.1 Popis měřeného vzorku

Pro daný experiment byl zvolen polotovár o rozměrech 40×40×25 mm. Materiál polotovaru je dobře obrobitelná slitina hliníku EN AW-6060 – AlMgSi0,5 F19. Celkem jsem měřil 49 vzorků, které se dají rozdělit do tří základních skupin.



Obrázek 31 Schéma jednotlivých skupin vzorků

Jak je vidět ze schématu v první části po 3osém frézování byl měřen jeden vzorek. V druhé části kdy se obrábělo 3+2osým frézováním pomocí os B a C. Hodnoty úhlu náklonu ve směru posuvu jsou označeny zeleně a jedná se o tažený nástroj. Hodnoty v bílém políčku jsou úhly naklonění ve směru kolmém na posuv ³⁶.

Třetí část obsahuje taktéž 24 vzorků, které se obráběli 5osým frézováním. Při 5osém frézování se do pohybu dostává všech 5 os (X, Y, Z, B, C). Podobně jako je tomu u 3+2osého frézování jsou zde nastaveny náklony ve směru posuvu a kolmo na posuv tak aby nástroj stále konal tažený pohyb ³⁶.

Hlavní rozdíl oproti 3+2osému frézování je ten že sklon osy nástroje se mění vůči tvaru plochy modelu. Díky tomu lze docílit lepší kvality povrchu a efektivnějšího využití břitu nástroje ³⁶.

7.2 Vyhodnocované parametry

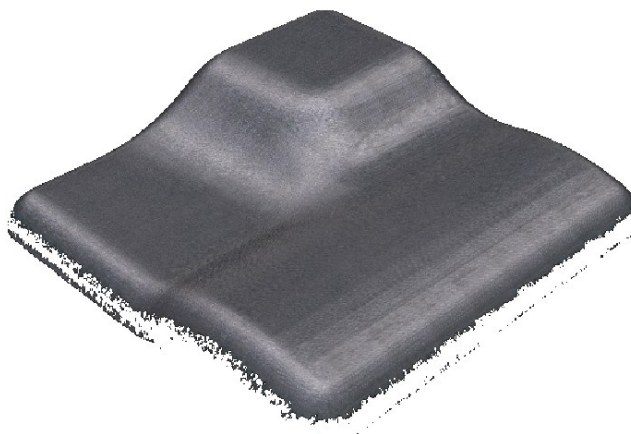
Z vyhodnocovaných parametrů lze získat podrobnější informace o zkoumaném povrchu, především díky plošným parametrům, které jsem mohl měřit. Také lze posoudit, jak se od sebe liší naměřené hodnoty ve stejném místě mezi profilovými parametry R_a , R_z od plošných parametrů S_a , S_z . Všechny vyhodnocované parametry byly detailně popsány v předchozích kapitolách.

Tabulka 4 Přehled vyhodnocovaných parametrů

Parametr	Jednotky	Definice
R_a	$[\mu\text{m}]$	Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu
R_z	$[\mu\text{m}]$	Největší výška profilu
S_a	$[\mu\text{m}]$	Aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu
S_z	$[\mu\text{m}]$	Maximální výška omezené stupnice povrchu
S_{vk}	$[\mu\text{m}]$	Redukovaná hloubka údolí
V_{vv}	$[\text{ml}\cdot\text{m}^{-2}]$	Neplatný objem údolí omezené stupnice povrchu

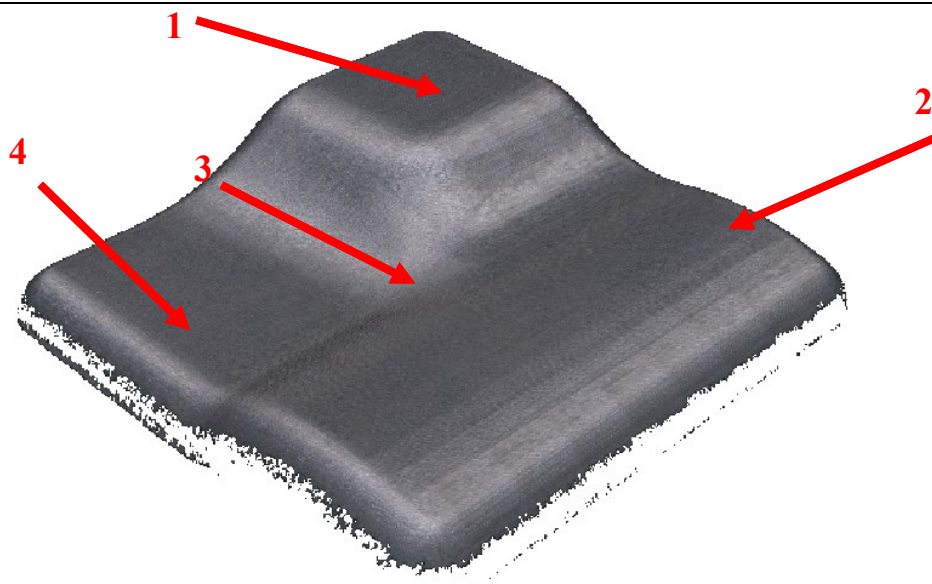
7.3 Měření místa na vzorku

Každý vzorek se nejprve samostatně skenoval na přístroji Alicona IF, který z něj vytvořil model. Model se poté měřil v příslušném softwaru IF-Laboratory Measurement. Skenování jednoho vzorku trvalo zhruba hodinu.



Obrázek 32 Model naskenovaného povrchu

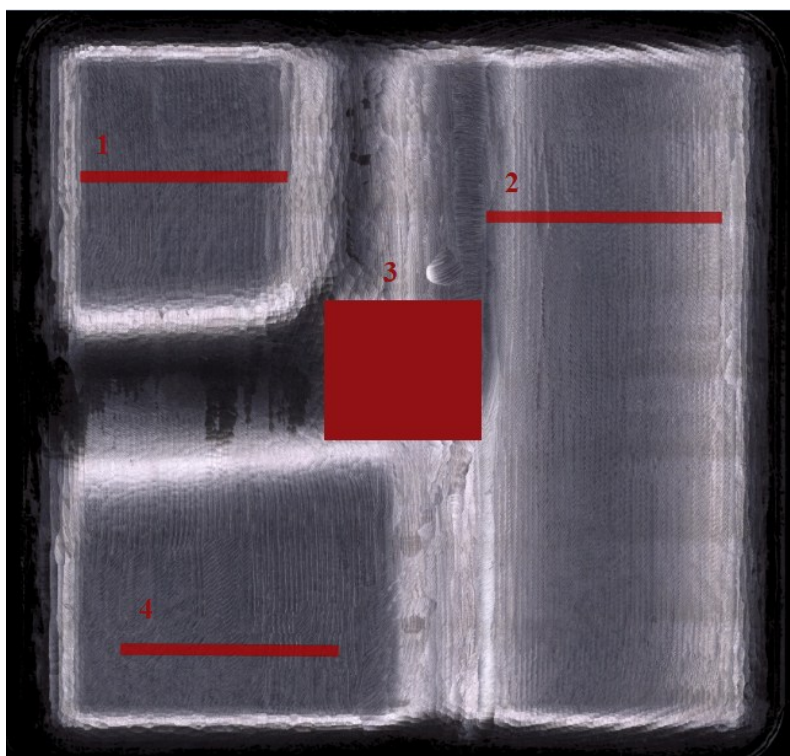
Měření drsnosti povrchu v softwaru IF-Laboratory Measurement probíhalo tak, že se nejprve měřila 2D drsnost na čtyřech místech povrchu. Poté se v softwaru měřila 3D drsnost rovněž na čtyřech místech povrchu. Na konkrétním obrázku 33 jsou znázorněny jednotlivé čtyři místa měření.



Obrázek 33 Místa měření

- 1 – Rovinná plocha, nejvyšší bod na povrchu vzorku,
- 2 – Zaoblená plocha,
- 3 – Údolí (křížení několika ploch),
- 4 – Rovinná plocha, nejnižší bod na povrchu vzorku.

Na příslušném obrázku lze vidět, kde přesně probíhalo měření 2D parametrů drsnosti povrchu.



Obrázek 34 Řezy pro měření 2D parametrů drsnosti povrchu

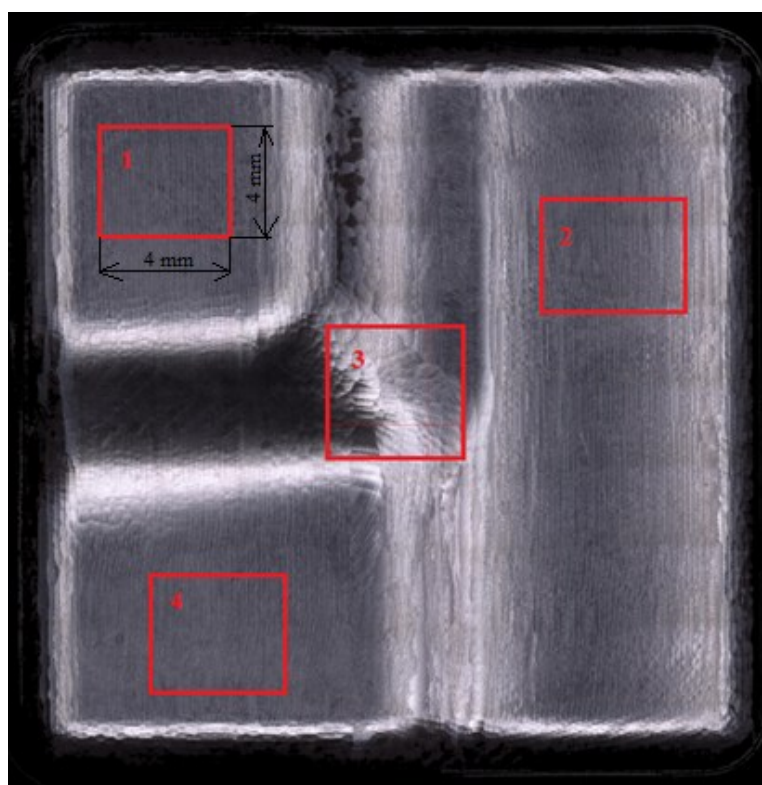
7.4 Měřená šířka, délka

Šířka řezů, ze kterých software zpracovával informace o 2D drsnosti povrchu jsou 0,7 mm pro plochy jedna, dva a čtyři šířka pro plochu 3 je 3,5 mm. Filtr LambdaC pro profilovou drsnost se volí dle normy resp. tabulky a pro plošnou drsnost norma neexistuje resp. tabulka, stroj sám automaticky navrhuje hodnotu.

Tabulka 5 Měřená délka a šířka pro 2D parametry drsnosti povrchu

Měřená místa ploch	Profile Length l [mm]	Width [μm]	Lc LambdaC: cut off wavelength [μm]
Plocha 1	6	700	800
Plocha 2	7	700	800
Plocha 3	5	3500	800
Plocha 4	7	700	800

Místa měření plošných parametrů drsnosti povrchu probíhalo obdobně jako u 2D parametrů. Velikost jednotlivých čtverců, ze kterých software zpracovával informace o povrchu jsou 4×4 mm - viz obrázek 35.



Obrázek 35 Místa pro měření plošných parametrů drsnosti povrchu

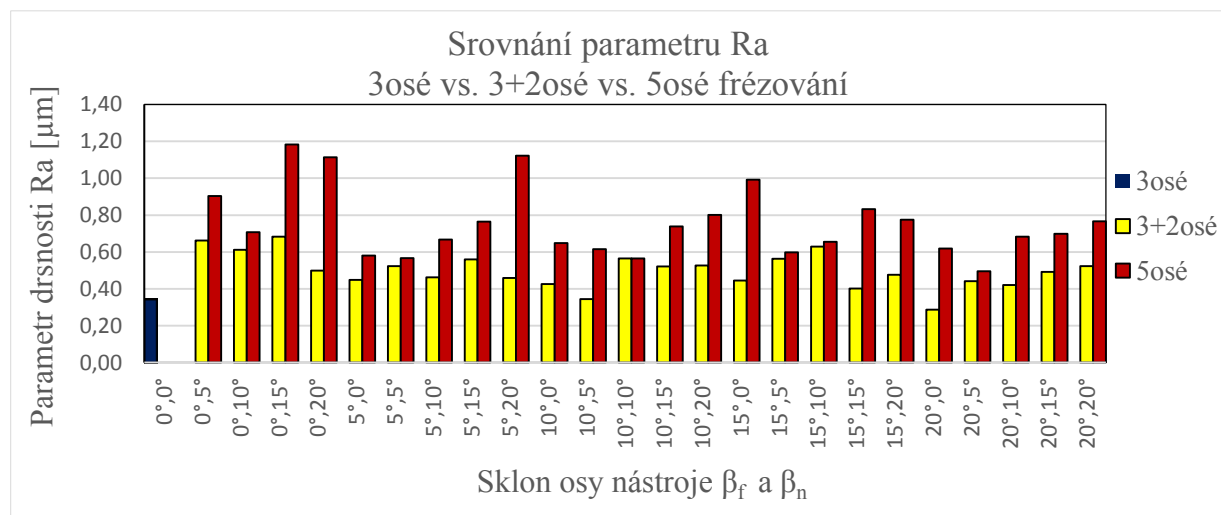
Jednotlivé způsoby měření pro 2D a 3D parametry drsnosti povrchu se od sebe liší tak, že u 2D měření se využívá k měření pouze profilové délky, kdežto pro 3D parametry se využívá hodnocení všemi směry.

7.5 Rovinná Plocha 1

Plochu 1 lze označit jako rovinnou, bez nějakých zakřivení či zaoblení.

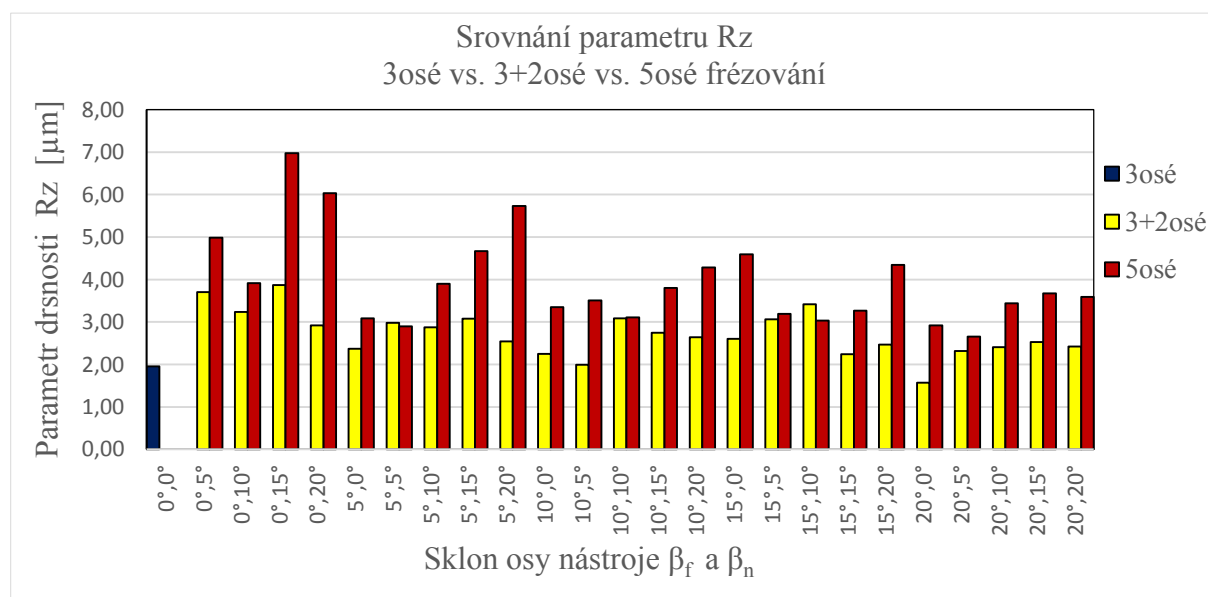
7.5.1 Hodnocení profilových parametrů Ra, Rz

Analýzou naměřených hodnot parametrů drsnosti Ra a Rz, lze konstatovat, že vykazují mnohem nižších hodnot při použití 3+2osého a 3osého frézování než při použití 5osého frézování. Parametr Ra je ve všech případech horší při použití 5osého frézování - viz obrázek 36.



Obrázek 36 Grafické srovnání parametru drsnosti Ra

U parametru Rz je to velice podobné jako u parametru Ra výjimkou jsou pouze dva náklony u kterých, lze docílit nižších hodnot použitím 5osého frézování - viz obrázek 37.

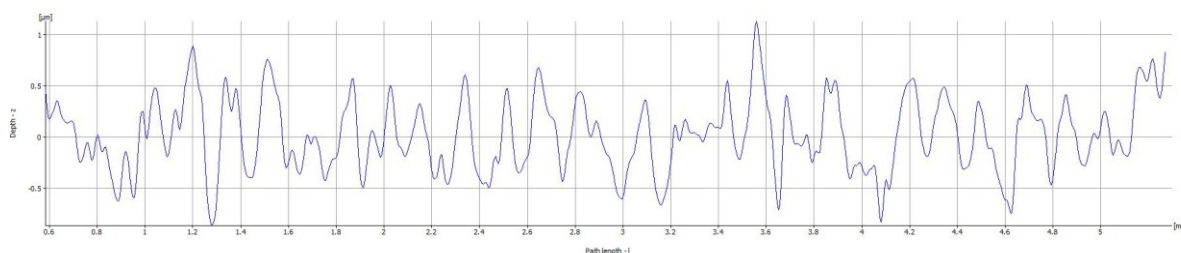


Obrázek 37 Grafické srovnání parametru drsnosti Rz

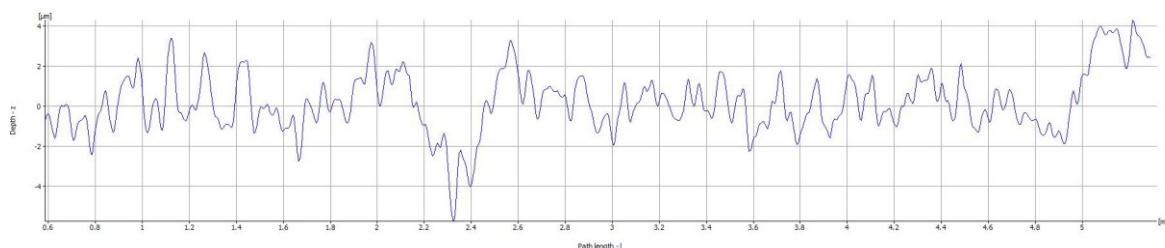
Tabulka 6 Porovnání nejefektivnějších a nejméně efektivních náklonů pro parametry Ra, Rz

3+2osé	Ra [μm]	Rz [μm]	5osé	Ra [μm]	Rz [μm]
$\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 5^\circ$	0,34	1,99	$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 15^\circ$	1,18	6,98
$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 0^\circ$	0,29	1,57	$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 20^\circ$	1,11	6,03
3osé			$\beta_f = 5^\circ, \beta_n = 20^\circ$	1,12	5,73
$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 0^\circ$	0,34	1,95			

Zeleně jsou označeny nejefektivnější náklony naopak ty nejméně efektivní náklony červeně.



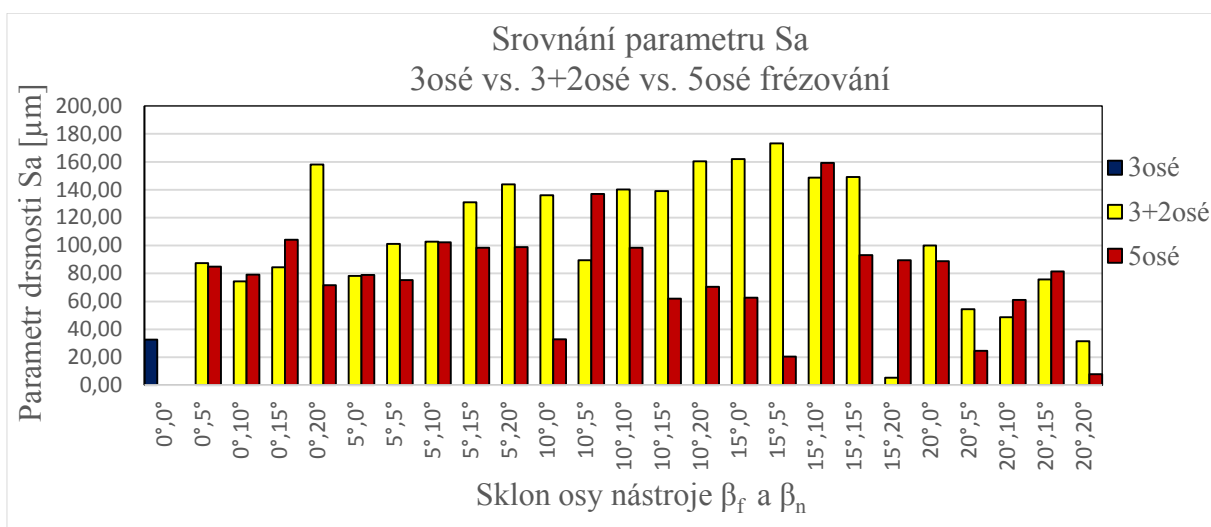
Obrázek 38 Profil drsnosti povrchu po 3+2osém frézování a náklonu $\beta_f = 20^\circ$, $\beta_n = 0^\circ$



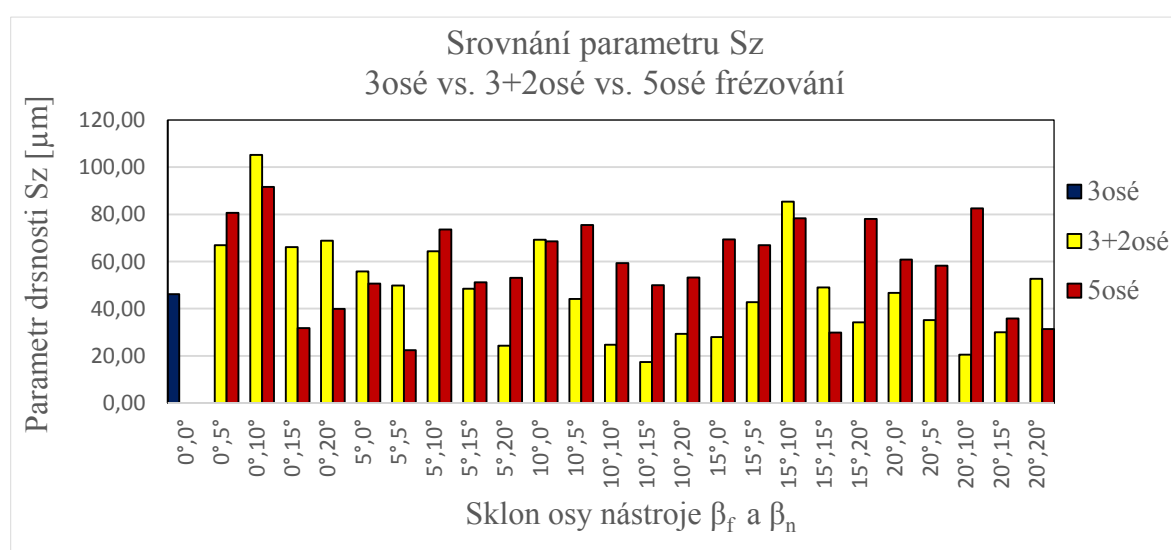
Obrázek 39 Profil drsnosti povrchu po 5osém frézování a náklonu $\beta_f = 0^\circ$, $\beta_n = 20^\circ$

7.5.2 Hodnocení parametrů Sa, Sz

Analýzou naměřených hodnot parametrů Sa a Sz, lze konstatovat, že naměřené hodnoty vykazují rozdílné hodnoty mezi jednotlivými způsoby frézování (3osé vs. 3+2osé vs. 5osé). Zmíněné náklony, které vykazovali dobré výsledky u profilových parametrů, jsou v plošném hodnocení průměrné.



Obrázek 40 Grafické srovnání parametru drsnosti Sa



Obrázek 41 Grafické srovnání parametru drsnosti Sz

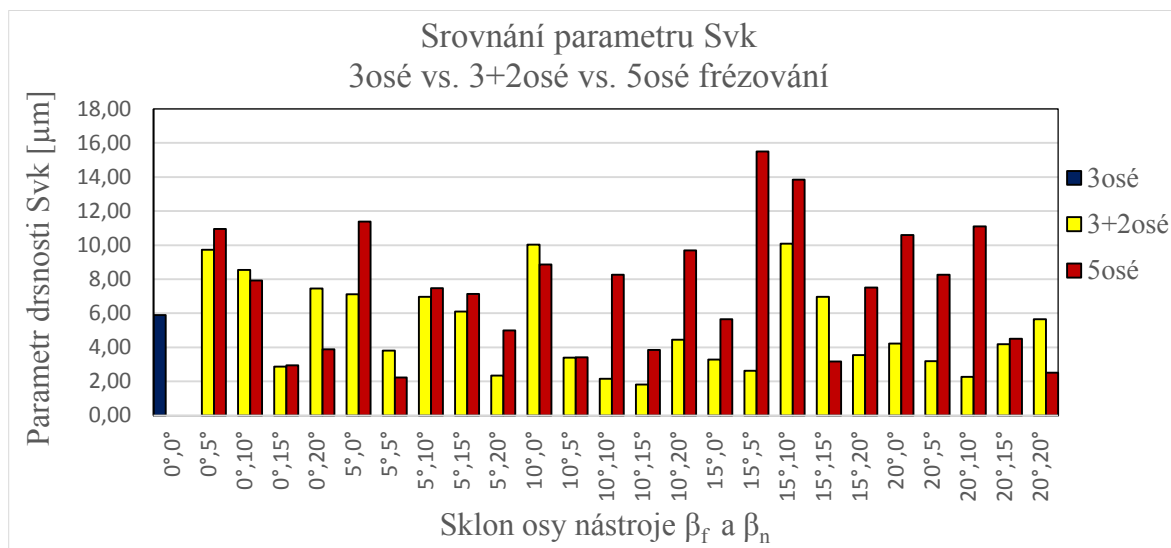
Tabulka 7 Porovnání nejefektivnějších a nejméně efektivních náklonů pro parametry Sa, Sz

3+2osé	Sa [μm]	Sz [μm]	3+2osé	Sa [μm]	Sz [μm]
$\beta_f = 15^\circ, \beta_n = 20^\circ$	5,33	34,17	$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 5^\circ$	87,46	67,00
$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 5^\circ$	54,50	35,17	$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 10^\circ$	74,86	105,70
$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 10^\circ$	48,64	20,54	$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 20^\circ$	158,15	68,84
$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 20^\circ$	31,51	52,74	$\beta_f = 15^\circ, \beta_n = 10^\circ$	148,77	85,43
5osé			5osé		
$\beta_f = 15^\circ, \beta_n = 5^\circ$	20,41	66,96	$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 10^\circ$	79,11	91,71
$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 5^\circ$	24,59	58,25	$\beta_f = 5^\circ, \beta_n = 10^\circ$	102,28	73,59
$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 20^\circ$	7,76	31,32	$\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 5^\circ$	136,86	75,50

Zeleně jsou označeny nejefektivnější náklony naopak ty nejméně efektivní náklony červeně.

7.5.3 Hodnocení parametru S_{vk}

Analýzou naměřených hodnot parametru S_{vk} , lze konstatovat, že použitím 3+2osého frézování lze docílit nižších hodnot než aplikací jiných náklonů. Při analýze toho parametru lze říci, že hned několik náklonů je velice efektivních.



Obrázek 42 Grafické srovnání parametru drsnosti S_{vk}

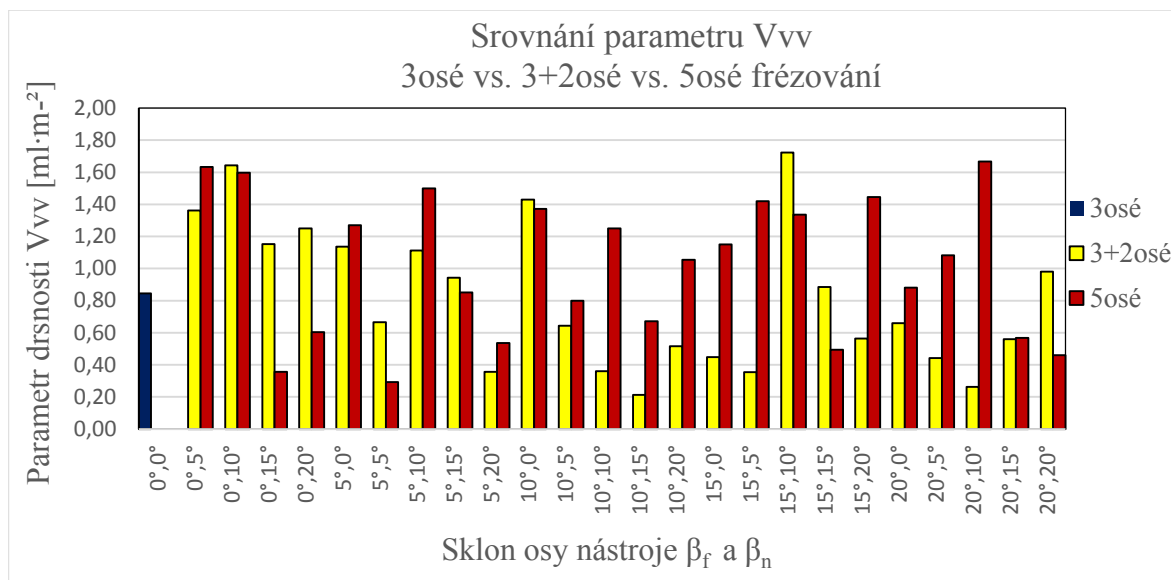
Tabulka 8 Porovnání nejefektivnějších a nejméně efektivních náklonů pro parametr S_{vk}

3+2osé	S_{vk} [μm]	3+2osé	S_{vk} [μm]
$\beta_f = 0^\circ$, $\beta_n = 15^\circ$	2,86	$\beta_f = 0^\circ$, $\beta_n = 5^\circ$	9,73
$\beta_f = 5^\circ$, $\beta_n = 20^\circ$	2,35	$\beta_f = 0^\circ$, $\beta_n = 10^\circ$	8,55
$\beta_f = 10^\circ$, $\beta_n = 10^\circ$	2,16	$\beta_f = 10^\circ$, $\beta_n = 0^\circ$	10,02
$\beta_f = 10^\circ$, $\beta_n = 15^\circ$	1,86	$\beta_f = 15^\circ$, $\beta_n = 10^\circ$	10,08
$\beta_f = 15^\circ$, $\beta_n = 5^\circ$	2,62		
$\beta_f = 20^\circ$, $\beta_n = 10^\circ$	2,27		
5osé		5osé	
$\beta_f = 0^\circ$, $\beta_n = 15^\circ$	2,94	$\beta_f = 0^\circ$, $\beta_n = 5^\circ$	10,96
$\beta_f = 5^\circ$, $\beta_n = 5^\circ$	2,23	$\beta_f = 5^\circ$, $\beta_n = 0^\circ$	11,38
$\beta_f = 20^\circ$, $\beta_n = 20^\circ$	2,52	$\beta_f = 15^\circ$, $\beta_n = 5^\circ$	15,50

Zeleně jsou označeny nejefektivnější náklony naopak ty nejméně efektivní náklony červeně.

7.5.4 Hodnocení parametru V_{vv}

Poslední měřený parametr V_{vv} spadá do skupiny objemových. Při analýze toho parametru lze říci, že hned několik náklonů je velice efektivních. Jak použitím 3+2osého tak použitím 5osého frézování lze dosáhnout nízkých hodnot parametru V_{vv} .

Obrázek 43 Grafické srovnání parametru drsnosti V_{vv} Tabulka 9 Porovnání nejefektivnějších a nejméně efektivních náklonů pro parametr V_{vv}

3+2osé	V_{vv} [ml·m ⁻²]	3+2osé	V_{vv} [ml·m ⁻²]
$\beta_f = 5^\circ, \beta_n = 20^\circ$	0,36	$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 5^\circ$	1,36
$\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 10^\circ$	0,36	$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 10^\circ$	1,64
$\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 15^\circ$	0,21	$\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 0^\circ$	1,43
$\beta_f = 15^\circ, \beta_n = 5^\circ$	0,36	$\beta_f = 15^\circ, \beta_n = 10^\circ$	1,72
$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 10^\circ$	0,26		
5osé		5osé	
$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 15^\circ$	0,36	$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 5^\circ$	1,63
$\beta_f = 5^\circ, \beta_n = 5^\circ$	0,29	$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 10^\circ$	1,60
$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 20^\circ$	0,46	$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 10^\circ$	1,67

Zeleně jsou označeny nejefektivnější náklony naopak ty nejméně efektivní náklony červeně.

7.5.5 Celkové porovnání náklonů pro rovinnou plochu 1

Při hodnocení pouze profilových parametrů drsnosti povrchu, lze říci, že použití 3+2osého a 3osého frézování je mnohem efektivnější než použití 5osého frézování. Jenže díky využití nových měřicích přístrojů, lze použít k hodnocení drsnosti povrchu i plošné parametry drsnosti povrchu, které poskytují mnohem komplexnější informace o hodnoceném povrchu.

V tabulce 10 je znázorněno porovnání mezi nejefektivnějšími náklony ty jsou označeny zeleně a naopak ty nejméně efektivní jsou označeny červeně. Přehled všech použitých náklonů pro rovinnou plochu 1 je uveden v přílohách.

Tabulka 10 Porovnání nejefektivnějších a nejméně efektivních náklonů pro rovinou plochu 1

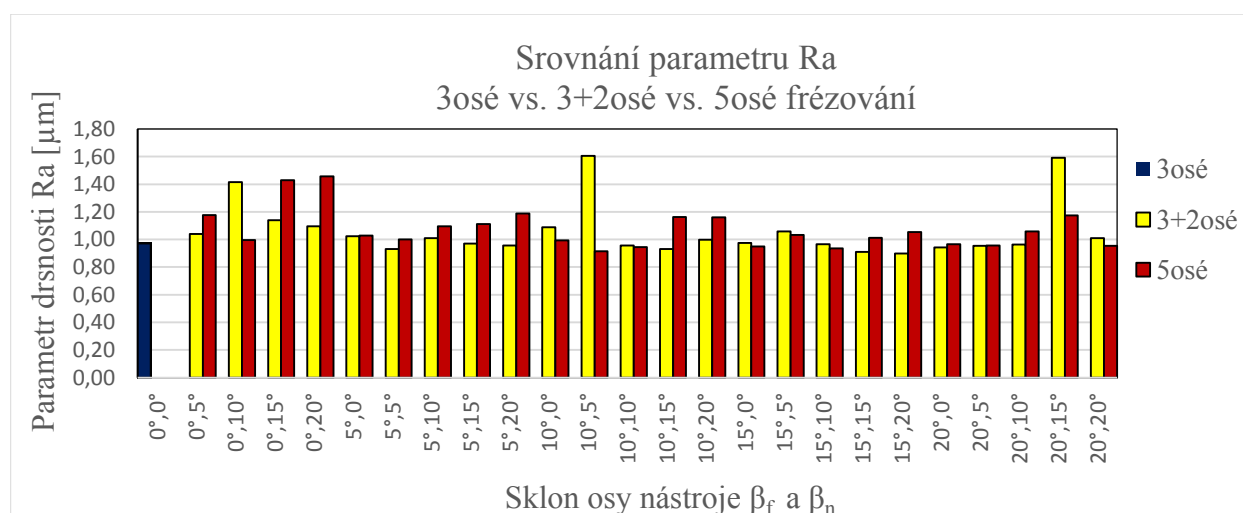
3+2osé	Ra [μm]	Rz [μm]	Sa [μm]	Sz [μm]	Svk [μm]	Vvv [ml·m ⁻²]
$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 5^\circ$	0,66	3,71	87,46	67,00	9,73	1,36
$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 10^\circ$	0,61	3,23	74,46	105,17	8,55	1,64
$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 15^\circ$	0,68	3,87	84,38	66,18	2,86	1,15
$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 20^\circ$	0,50	2,92	158,15	68,84	7,45	1,25
$\beta_f = 15^\circ, \beta_n = 10^\circ$	0,63	3,42	148,77	85,43	10,08	1,72
$\beta_f = 15^\circ, \beta_n = 20^\circ$	0,48	2,47	5,33	34,17	3,55	0,56
$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 5^\circ$	0,44	2,32	54,50	35,17	3,18	0,44
$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 10^\circ$	0,42	2,40	48,64	20,54	2,27	0,26
5osé	Ra [μm]	Rz [μm]	Sa [μm]	Sz [μm]	Svk [μm]	Vvv [ml·m ⁻²]
$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 5^\circ$	0,90	4,99	84,84	80,70	10,96	1,63
$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 10^\circ$	0,71	3,91	79,11	91,71	7,93	1,60
$\beta_f = 5^\circ, \beta_n = 5^\circ$	0,57	2,89	75,35	22,40	2,23	0,29
$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 20^\circ$	0,77	3,59	7,76	31,32	2,52	0,46

7.6 Mírně zaoblená plocha 2

Plochu 2 lze označit jako mírně zaoblenou plochu na stranách.

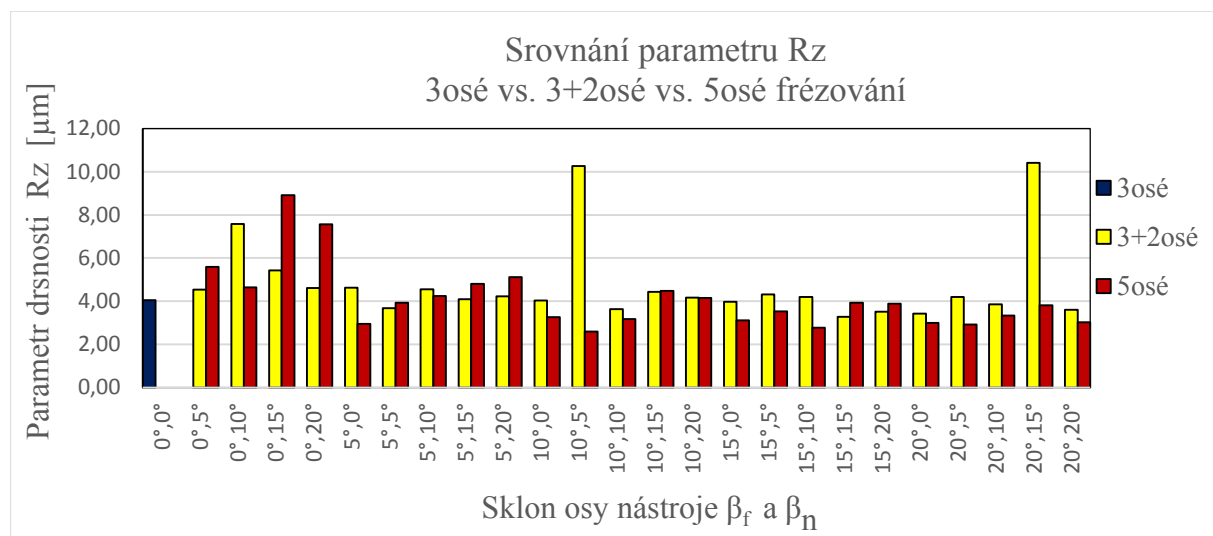
7.6.1 Hodnocení profilových parametrů Ra, Rz

Analýzou naměřených hodnot parametru Ra byly naměřeny relativně velmi malé rozdíly mezi jednotlivými náklony - viz obrázek 44. Naměřené hodnoty parametru Ra se pohybují od 0,9 - 1,1 μm.



Obrázek 44 Grafické srovnání parametru drsnosti Ra

U měřeného parametru Rz lze konstatovat, že použitím 5osého frézování lze docílit nižších hodnot - viz obrázek 45.

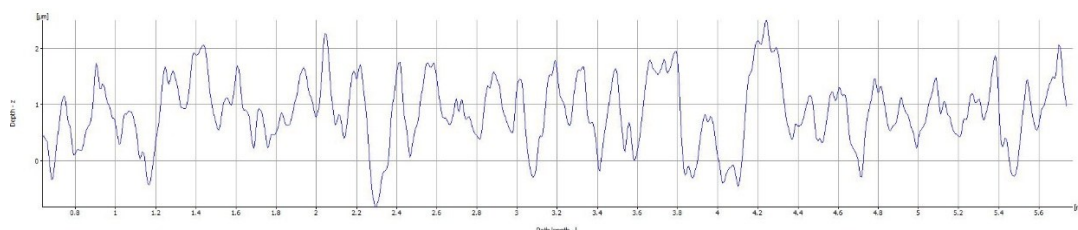


Obrázek 45 Grafické srovnání parametru drsnosti Rz

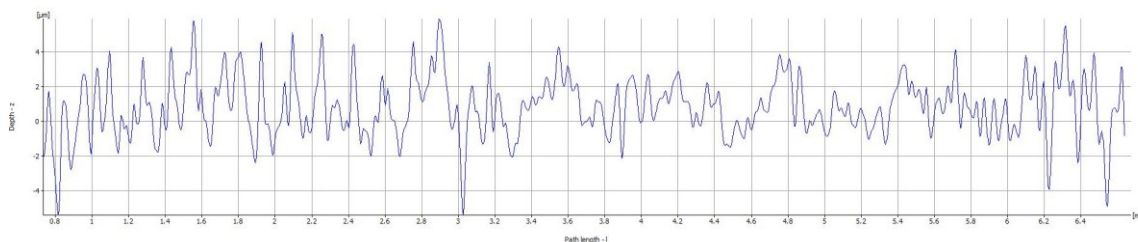
V tabulce 11 je znázorněno porovnání mezi nejefektivnějšími náklony ty jsou označeny zeleně a naopak ty nejméně efektivní jsou označeny červeně.

Tabulka 11 Porovnání nejefektivnějších a nejméně efektivních náklonů pro parametry Ra, Rz

3+2osé	Ra [μm]	Rz [μm]	3+2osé	Ra [μm]	Rz [μm]
$\beta_f = 15^\circ, \beta_n = 20^\circ$	0,90	3,52	$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 10^\circ$	1,42	7,58
5osé			$\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 5^\circ$	1,60	10,26
$\beta_f = 5^\circ, \beta_n = 0^\circ$	1,03	2,96	$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 15^\circ$	1,59	10,42
$\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 5^\circ$	0,92	2,59	5osé		
$\beta_f = 15^\circ, \beta_n = 10^\circ$	0,94	2,78	$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 15^\circ$	1,14	5,43
$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 5^\circ$	0,96	2,92	$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 20^\circ$	1,09	4,61



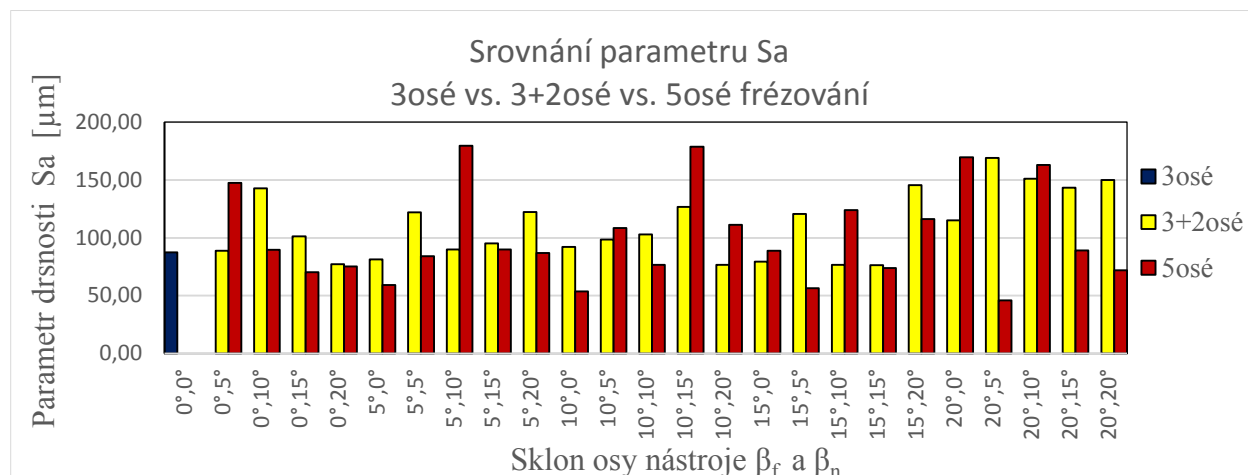
Obrázek 46 Profil drsnosti povrchu po 5osém frézování a náklonu $\beta_f = 10^\circ$, $\beta_n = 5^\circ$



Obrázek 47 Profil drsnosti povrchu po 5osém obrábění a náklonu $\beta_f = 0^\circ$, $\beta_n = 15^\circ$

7.6.2 Hodnocení parametrů S_a , S_z

Analýzou naměřených hodnot parametru S_a vyplývá, že aplikace 5osého frézování je efektivnější než použití 3osého nebo 3+2osého frézování - viz obrázek 48.



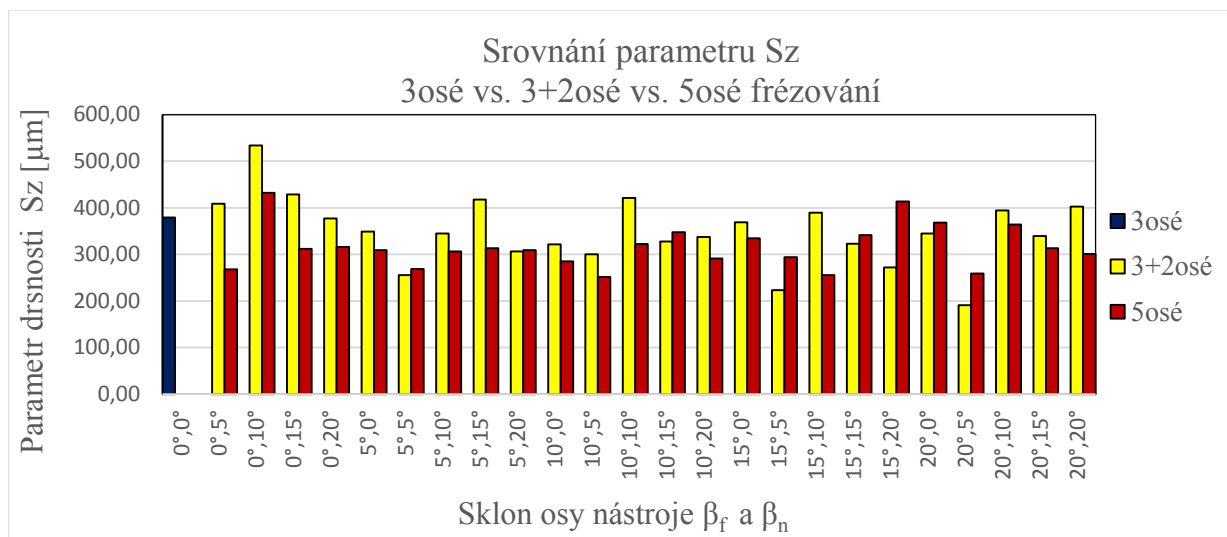
Obrázek 48 Grafické srovnání parametru drsnosti S_a

Použitím nejefektivnějších náklonů u 5osého frézování lze dosáhnout hodnot parametru S_a cca 50 μm . Kdežto použitím nejefektivnějších náklonů u 3+2osého frézování lze dosáhnout hodnot parametru S_a cca 70 μm . V tabulce 12 je uvedeno porovnání náklonů. Zeleně jsou označeny nejefektivnější náklony naopak ty nejméně efektivní náklony červeně.

Tabulka 12 Porovnání nejefektivnějších a nejméně efektivních náklonů pro parametr S_a

3+2osé	S_a [μm]	3+2osé	S_a [μm]
$\beta_f = 0^\circ$, $\beta_n = 20^\circ$	77,16	$\beta_f = 0^\circ$, $\beta_n = 10^\circ$	142,88
$\beta_f = 10^\circ$, $\beta_n = 20^\circ$	76,67	$\beta_f = 20^\circ$, $\beta_n = 5^\circ$	168,99
$\beta_f = 15^\circ$, $\beta_n = 0^\circ$	79,36	$\beta_f = 20^\circ$, $\beta_n = 10^\circ$	151,18
$\beta_f = 15^\circ$, $\beta_n = 10^\circ$	76,71	$\beta_f = 20^\circ$, $\beta_n = 15^\circ$	143,38
$\beta_f = 15^\circ$, $\beta_n = 15^\circ$	76,42	$\beta_f = 20^\circ$, $\beta_n = 20^\circ$	150,06
5osé		5osé	
$\beta_f = 5^\circ$, $\beta_n = 0^\circ$	59,28	$\beta_f = 5^\circ$, $\beta_n = 10^\circ$	179,72
$\beta_f = 10^\circ$, $\beta_n = 0^\circ$	53,74	$\beta_f = 10^\circ$, $\beta_n = 15^\circ$	178,84
$\beta_f = 15^\circ$, $\beta_n = 5^\circ$	56,43	$\beta_f = 20^\circ$, $\beta_n = 0^\circ$	169,53
$\beta_f = 20^\circ$, $\beta_n = 5^\circ$	45,75	$\beta_f = 20^\circ$, $\beta_n = 10^\circ$	162,99

Při hodnocení parametru Sz, je patrné že použitím 5osého frézování lze dosáhnout v průměru nižších hodnot než použitím 3+2osého frézování. Z naměřených hodnot vyplývá, že zmíněné náklony u 5osého frézování pro parametr Sa, jsou vhodné i pro parametr Sz. Toto tvrzení, nelze říci o 3+2osém frézování kde jsou efektivní jiné náklony, než tomu bylo u parametru Sa.



Obrázek 49 Grafické srovnání parametru drsnosti Sz

Tabulka 13 Porovnání nejefektivnějších a nejméně efektivních náklonů pro parametr Sz

3+2osé	Sz [μm]	3+2osé	Sz [μm]
$\beta_f = 5^\circ, \beta_n = 5^\circ$	255,79	$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 10^\circ$	533,86
$\beta_f = 15^\circ, \beta_n = 5^\circ$	222,91	$\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 10^\circ$	421,16
$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 5^\circ$	190,91	$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 10^\circ$	533,86
5osé		5osé	
$\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 5^\circ$	251,48	$\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 15^\circ$	306,62
$\beta_f = 15^\circ, \beta_n = 10^\circ$	255,52	$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 0^\circ$	347,54
$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 5^\circ$	258,75	$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 10^\circ$	368,51

Zeleně jsou označeny nejefektivnější náklony naopak ty nejméně efektivní náklony červeně.

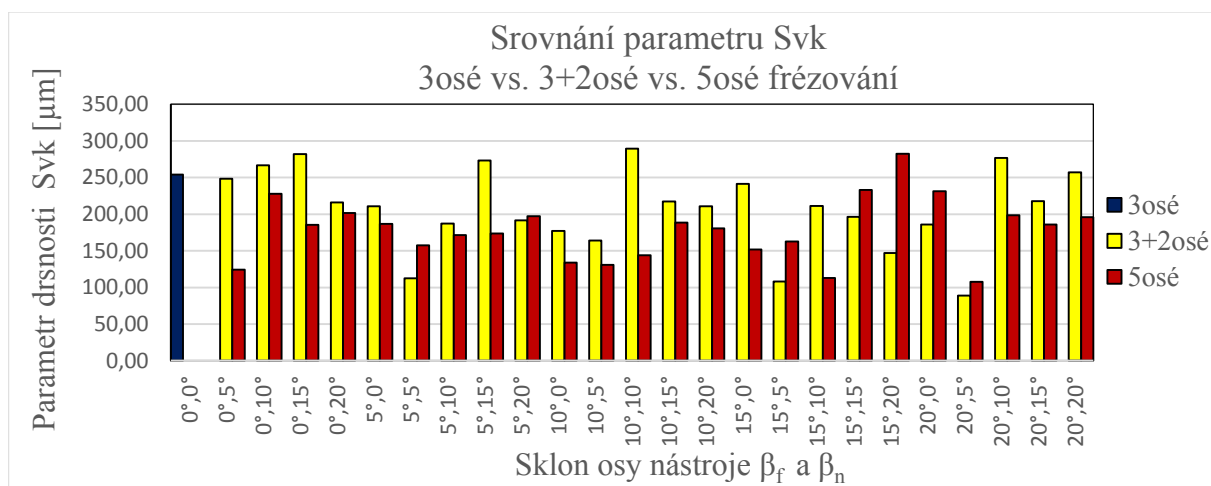
V tabulce 14 je uvedeno porovnání pro parametry Sa a Sz mezi nejefektivnějšími náklony ty jsou označeny zeleně a naopak těmi nejméně efektivními ty jsou označeny červeně.

Tabulka 14 Porovnání nejefektivnějších a nejméně efektivních náklonů pro parametry Sa, Sz

3+2osé	Sa [μm]	Sz [μm]	3+2osé	Sa [μm]	Sz [μm]
$\beta_f = 5^\circ, \beta_n = 5^\circ$	122,06	255,79	$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 10^\circ$	142,88	533,86
$\beta_f = 15^\circ, \beta_n = 5^\circ$	120,7	222,91	$\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 10^\circ$	102,95	421,16
5osé			$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 15^\circ$	143,38	339,29
$\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 0^\circ$	53,74	285,12	$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 20^\circ$	150,06	402,57
$\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 5^\circ$	108,45	251,48	$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 10^\circ$	142,88	533,86
$\beta_f = 15^\circ, \beta_n = 5^\circ$	56,43	294,13	5osé		
$\beta_f = 15^\circ, \beta_n = 10^\circ$	124,04	255,52	$\beta_f = 5^\circ, \beta_n = 10^\circ$	179,72	306,62
$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 5^\circ$	45,75	258,75	$\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 15^\circ$	178,84	347,54

7.6.3 Parametr Svk

Z analýzy parametru Svk, lze pozorovat, že naměřené hodnoty mají velké rozdíly mezi sebou - viz obrázek 50. V průměru nižších hodnot toho parametru, docílíme použitím 5osého frézování. V tabulce 15 je znázorněno porovnání mezi nejefektivnějšími náklony ty jsou označeny zeleně a naopak ty nejméně efektivní jsou označeny červeně.



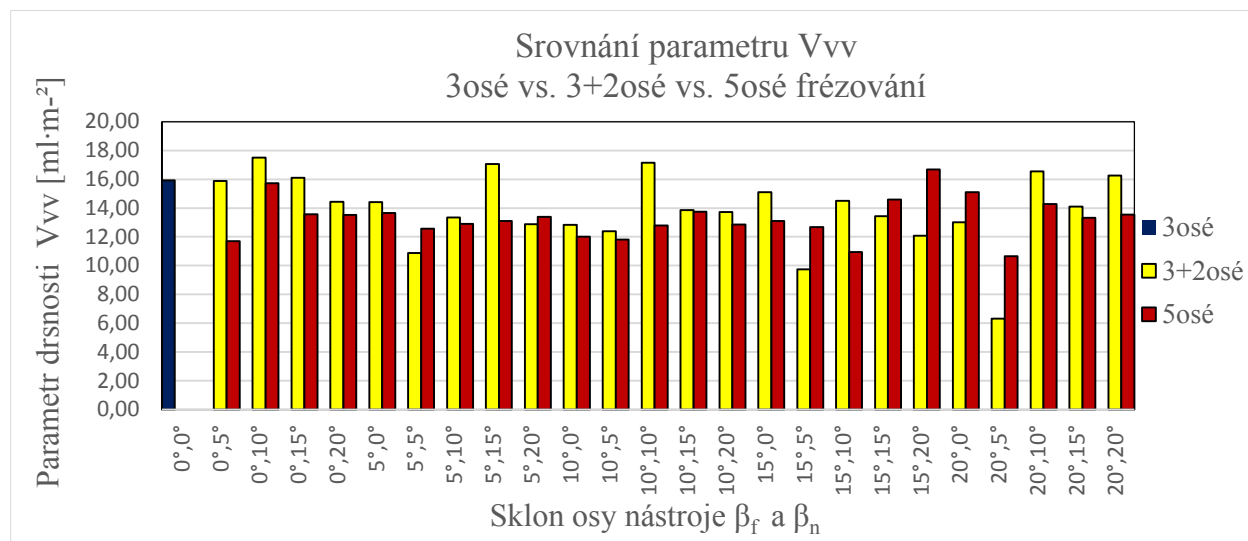
Obrázek 50 Grafické srovnání parametru drsnosti Svk

Tabulka 15 Porovnání nejefektivnějších a nejméně efektivních náklonů pro parametr Svk

3+2osé	Svk [μm]	3+2osé	Svk [μm]
$\beta_f = 5^\circ, \beta_n = 5^\circ$	112,35	$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 10^\circ$	266,35
$\beta_f = 15^\circ, \beta_n = 5^\circ$	108,28	$\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 10^\circ$	289,45
$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 5^\circ$	88,73	$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 20^\circ$	257,11
5osé		5osé	
$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 5^\circ$	124,11	$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 10^\circ$	222,78
$\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 0^\circ$	133,87	$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 20^\circ$	201,62
$\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 5^\circ$	130,86	$\beta_f = 15^\circ, \beta_n = 15^\circ$	233,16
$\beta_f = 15^\circ, \beta_n = 10^\circ$	112,77	$\beta_f = 15^\circ, \beta_n = 20^\circ$	282,49
$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 5^\circ$	107,70	$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 0^\circ$	231,36

7.6.4 Parametr V_{vv}

Z naměřených hodnot objemového parametru V_{vv} , vyplývá že, nižších hodnot lze dosáhnout použitím 3+2osého frézování.



Obrázek 51 Grafické srovnání parametru drsnosti V_{vv}

Tabulka 16 Porovnání nejefektivnějších a nejméně efektivních náklonů pro parametr V_{vv}

3+2osé	V_{vv} [$\text{ml} \cdot \text{m}^{-2}$]	3+2osé	V_{vv} [$\text{ml} \cdot \text{m}^{-2}$]
$\beta_f = 5^\circ, \beta_n = 5^\circ$	10,89	$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 10^\circ$	17,50
$\beta_f = 15^\circ, \beta_n = 5^\circ$	9,74	$\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 10^\circ$	17,14
$\beta_f = 15^\circ, \beta_n = 20^\circ$	12,08	$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 15^\circ$	14,10
$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 5^\circ$	6,31	$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 20^\circ$	16,25
5osé		5osé	
$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 5^\circ$	11,71	$\beta_f = 5^\circ, \beta_n = 10^\circ$	12,90
$\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 5^\circ$	11,82	$\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 15^\circ$	13,75
$\beta_f = 15^\circ, \beta_n = 10^\circ$	10,95	$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 0^\circ$	15,06
$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 5^\circ$	10,65	$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 10^\circ$	14,27

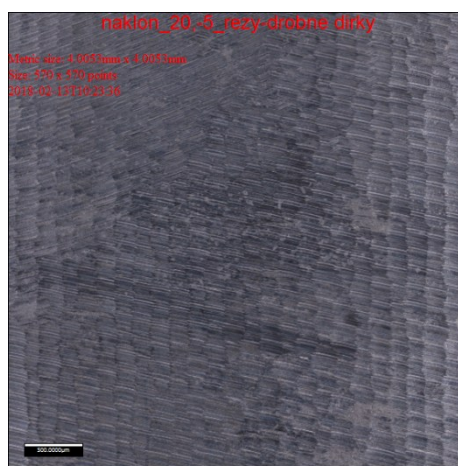
Zeleně jsou označeny nejefektivnější náklony naopak ty nejméně efektivní náklony červeně.

7.6.5 Celkové porovnání náklonů pro mírně zaoblenou plochu 2

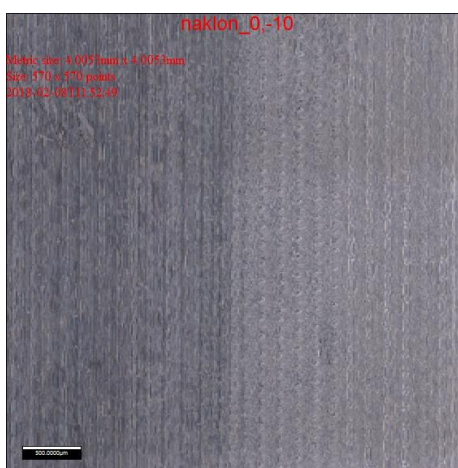
Z analýzy naměřených hodnot vyplývá, že jako nejefektivnější náklon se jeví 5osý $\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 5^\circ$, který je uveden spolu s dalšími náklony v tabulce 17, kterými lze dosáhnout dobré jakosti povrchu. V tabulce 17 je znázorněno porovnání mezi nejefektivnějšími náklony ty jsou označeny zeleně a naopak ty nejméně efektivní jsou označeny červeně. Přehled všech použitých náklonů pro mírně zaoblenou plochu 2 je uveden v přílohách.

Tabulka 17 Porovnání nejefektivnějších a nejméně efektivních náklonů pro rovinou plochu 2

3+2osé	Ra [μm]	Rz [μm]	Sa [μm]	Sz [μm]	Svk [μm]	Vvv [ml·m⁻²]
$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 10^\circ$	1,42	7,58	142,88	533,86	266,35	17,50
$\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 10^\circ$	0,96	3,64	102,95	421,16	289,45	17,14
$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 15^\circ$	1,59	10,42	143,38	339,29	217,83	14,10
$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 20^\circ$	1,01	3,60	150,06	402,57	257,11	16,25
$\beta_f = 5^\circ, \beta_n = 5^\circ$	0,93	3,68	122,06	255,79	112,35	10,89
$\beta_f = 15^\circ, \beta_n = 5^\circ$	1,06	4,31	120,7	222,91	108,28	9,74
5osé	Ra [μm]	Rz [μm]	Sa [μm]	Sz [μm]	Svk [μm]	Vvv [ml·m⁻²]
$\beta_f = 5^\circ, \beta_n = 10^\circ$	1,09	4,25	179,72	306,62	171,58	12,90
$\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 15^\circ$	1,16	4,48	178,84	347,54	188,42	13,75
$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 0^\circ$	0,97	3,00	169,53	368,51	231,36	15,06
$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 10^\circ$	1,06	3,34	162,99	363,90	198,64	14,27
$\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 5^\circ$	0,92	2,59	108,45	251,48	130,86	11,82
$\beta_f = 15^\circ, \beta_n = 5^\circ$	1,03	3,53	56,43	294,13	162,57	12,67
$\beta_f = 15^\circ, \beta_n = 10^\circ$	0,94	2,78	124,04	255,52	112,77	10,95
$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 5^\circ$	0,96	2,92	45,75	258,75	105,70	10,65



Obrázek 52 Filtrovaná plocha po 5osém frézování a náklonu $\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 5^\circ$



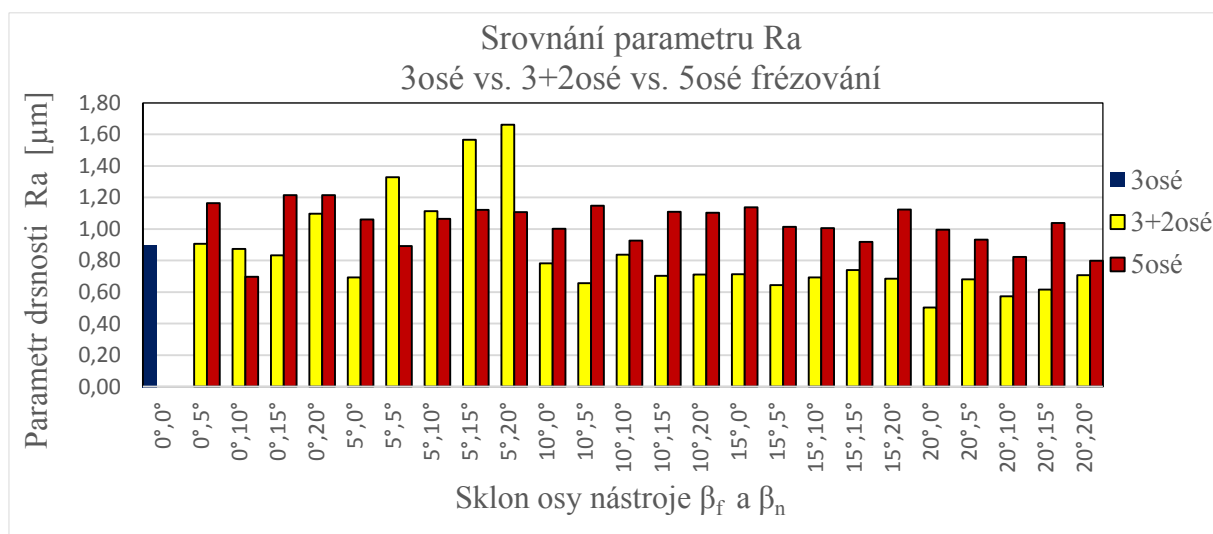
Obrázek 53 Filtrovaná plocha po 3+2osém frézování a náklonu $\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 10^\circ$

7.7 Údolí Plocha 3

Plochu 3 lze označit jako údolí. Na ploše 3 je drsnost povrchu nejhorší v porovnání s ostatními měřenými plochami. Může za to složitější tvar plochy, který ovlivňuje obrábění.

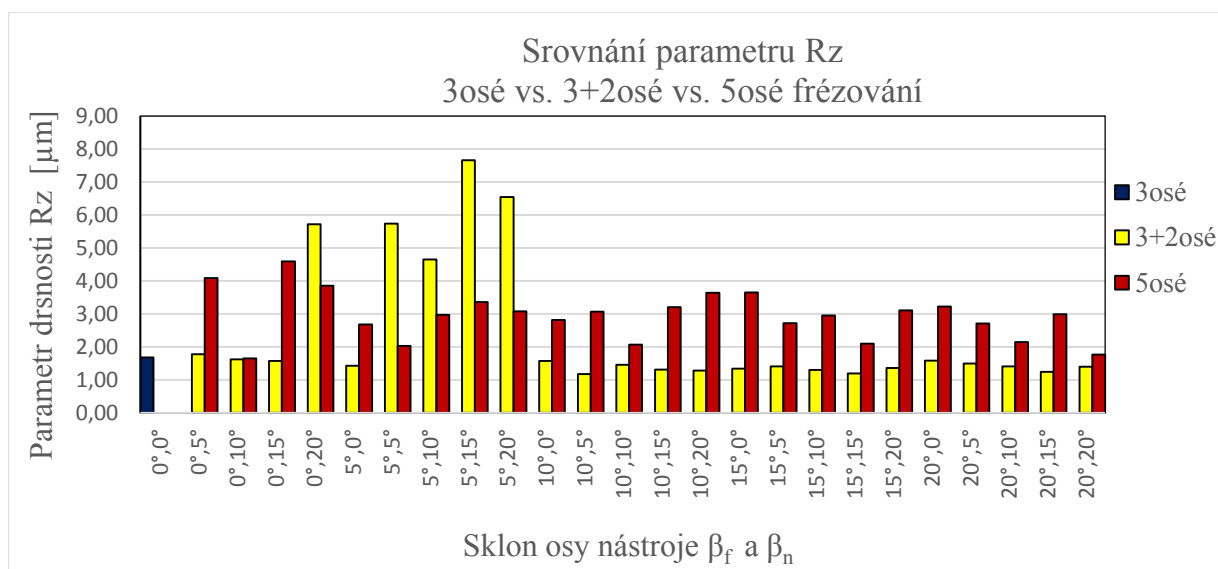
7.7.1 Hodnocení profilových parametrů Ra, Rz

Analýzou naměřených hodnot parametru Ra, lze říci, že nejnižších hodnot tohoto parametru dosáhneme použitím 3+2osého frézování viz obrázek 54. Při použití efektivních náklonů, lze dosáhnout hodnot parametru Ra od 0,5 - 0,7 μm .



Obrázek 54 Grafické srovnání parametru drsnosti Ra

U analýzy parametru Rz, je to velice podobné jako u parametru Ra. Analýzou naměřených hodnot, lze konstatovat, že použití 3+2osého frézování je efektivnější než použití 3osého nebo 5osého frézování.

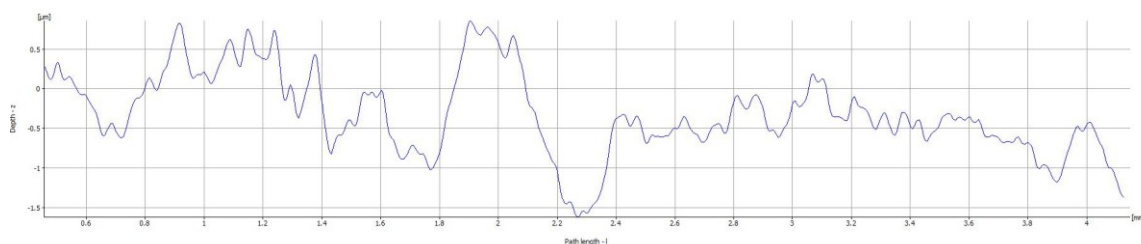


Obrázek 55 Grafické srovnání parametru drsnosti Rz

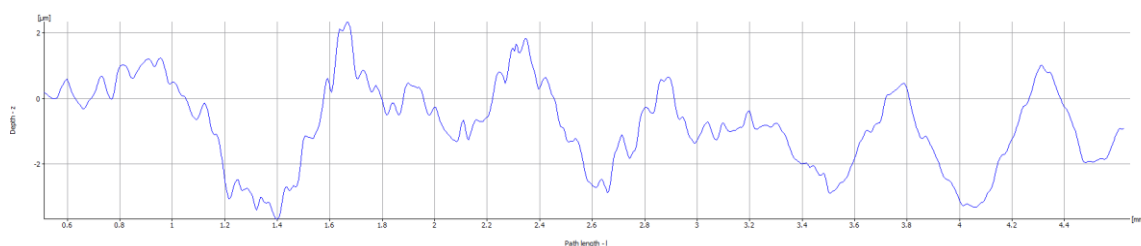
Tabulka 18 Porovnání nejefektivnějších a nejméně efektivních náklonů pro parametry Ra, Rz

3+2osé	Ra [μm]	Rz [μm]	3+2osé	Ra [μm]	Rz [μm]
$\beta_f = 5^\circ, \beta_n = 0^\circ$	0,69	1,43	$\beta_f = 5^\circ, \beta_n = 10^\circ$	1,11	4,66
$\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 5^\circ$	0,66	1,18	$\beta_f = 5^\circ, \beta_n = 15^\circ$	1,56	7,67
$\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 15^\circ$	0,70	1,31	$\beta_f = 5^\circ, \beta_n = 20^\circ$	1,66	6,55
$\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 20^\circ$	0,71	1,29	5osé		
$\beta_f = 15^\circ, \beta_n = 0^\circ$	0,71	1,34	$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 15^\circ$	1,21	4,60
$\beta_f = 15^\circ, \beta_n = 5^\circ$	0,64	1,41	$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 20^\circ$	1,22	3,86
$\beta_f = 15^\circ, \beta_n = 10^\circ$	0,69	1,30	$\beta_f = 5^\circ, \beta_n = 15^\circ$	1,12	3,36
$\beta_f = 15^\circ, \beta_n = 15^\circ$	0,74	1,19	$\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 15^\circ$	1,11	3,21
$\beta_f = 15^\circ, \beta_n = 20^\circ$	0,69	1,36	$\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 20^\circ$	1,10	3,64
$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 0^\circ$	0,50	1,59	$\beta_f = 15^\circ, \beta_n = 0^\circ$	1,14	3,65
$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 5^\circ$	0,68	1,50			
$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 10^\circ$	0,57	1,41			
$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 15^\circ$	0,62	1,24			
$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 20^\circ$	0,71	1,39			

Zeleně jsou označeny nejefektivnější náklony naopak ty nejméně efektivní náklony červeně.



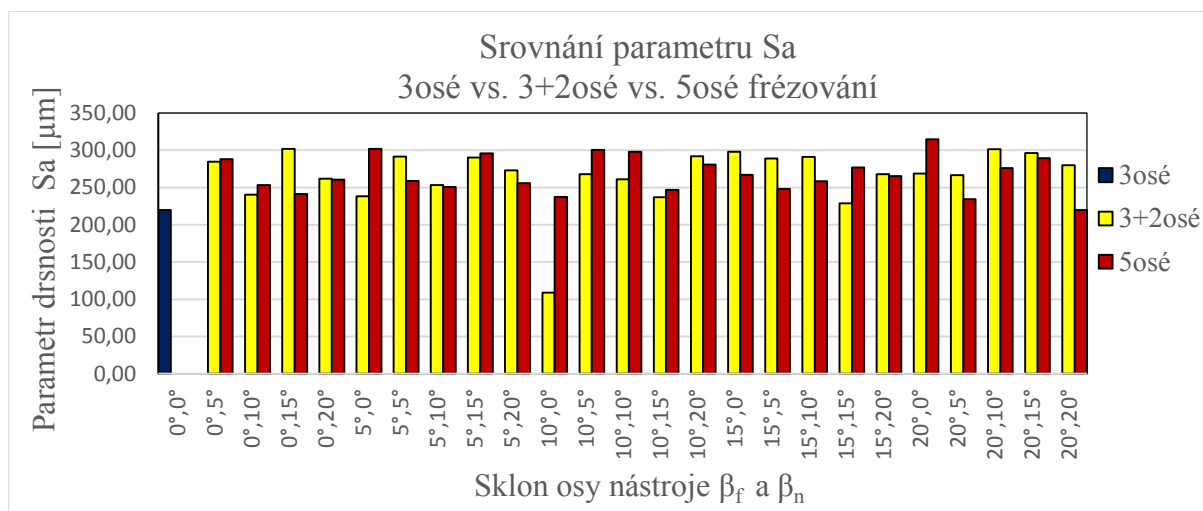
Obrázek 56 Profil drsnosti povrchu po 3+2osém frézování s náklonu $\beta_f = 20^\circ$, $\beta_n = 0^\circ$



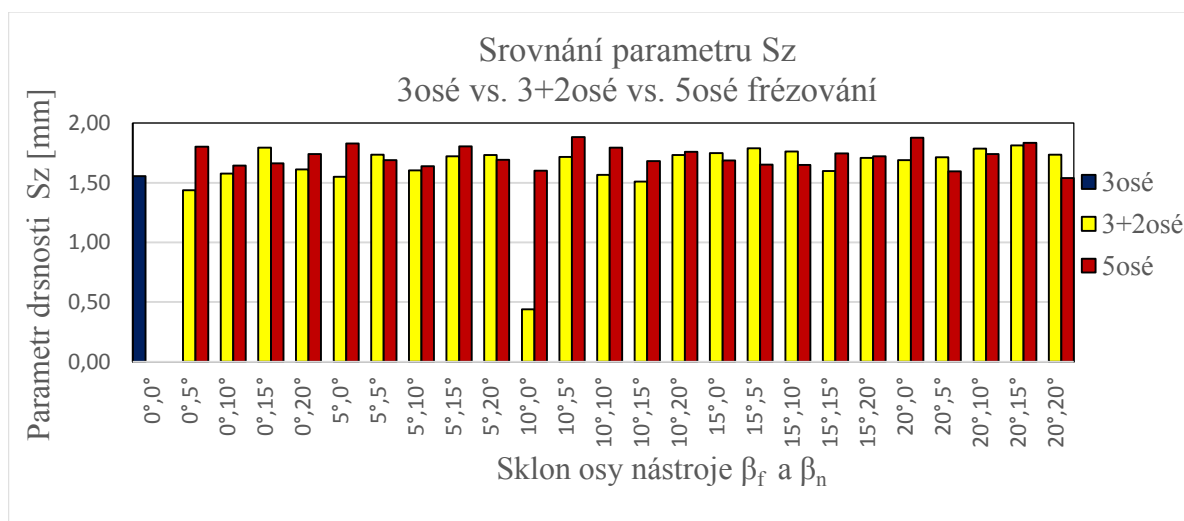
Obrázek 57 Profil drsnosti povrchu po 5osém frézování s náklonu $\beta_f = 0^\circ$, $\beta_n = 10^\circ$

7.7.2 Hodnocení parametrů Sa, Sz

Analýzou naměřených hodnot parametru Sa a Sz, lze říci, že rozdíly mezi jednotlivými způsoby frézování (3osé vs. 3+2osé vs. 5osé) jsou minimální. Jako nejefektivnější náklon se jeví náklon $\beta_f = 10^\circ$, $\beta_n = 0^\circ$ u 3+2osého frézování. Tímto náklonem lze dosáhnout nejnižších hodnot parametrů Sa a Sz.



Obrázek 58 Grafické srovnání parametru drsnosti Sa



Obrázek 59 Grafické srovnání parametru drsnosti Sz

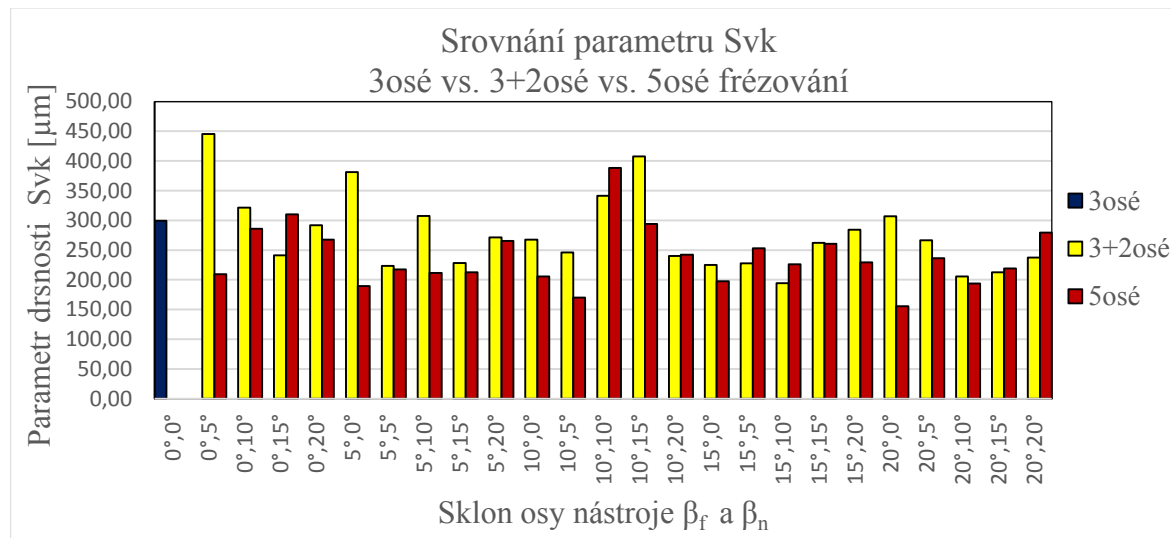
Tabulka 19 Porovnání nejefektivnějších a nejméně efektivních náklonů pro parametry Sa, Sz

3+2osé	Sa [μm]	Sz [mm]	3+2osé	Sa [μm]	Sz [mm]
$\beta_f = 10^\circ$, $\beta_n = 0^\circ$	108,80	0,44	$\beta_f = 0^\circ$, $\beta_n = 15^\circ$	301,63	1,79
5osé			5osé		
$\beta_f = 20^\circ$, $\beta_n = 20^\circ$	219,84	1,54	$\beta_f = 20^\circ$, $\beta_n = 0^\circ$	314,93	1,88

Zeleně jsou označeny nejefektivnější náklony naopak ty nejméně efektivní náklony červeně.

7.7.3 Parametr S_{vk}

Z analýzy naměřených hodnot parametru S_{vk} , lze tvrdit, že efektivnější se jeví použití 5osého frézování. Těmito náklony lze dosáhnout v průměru nižších hodnot parametru S_{vk} , než použitím 3osého a 3+2osého frézování.



Obrázek 60 Grafické srovnání parametru drsnosti S_{vk}

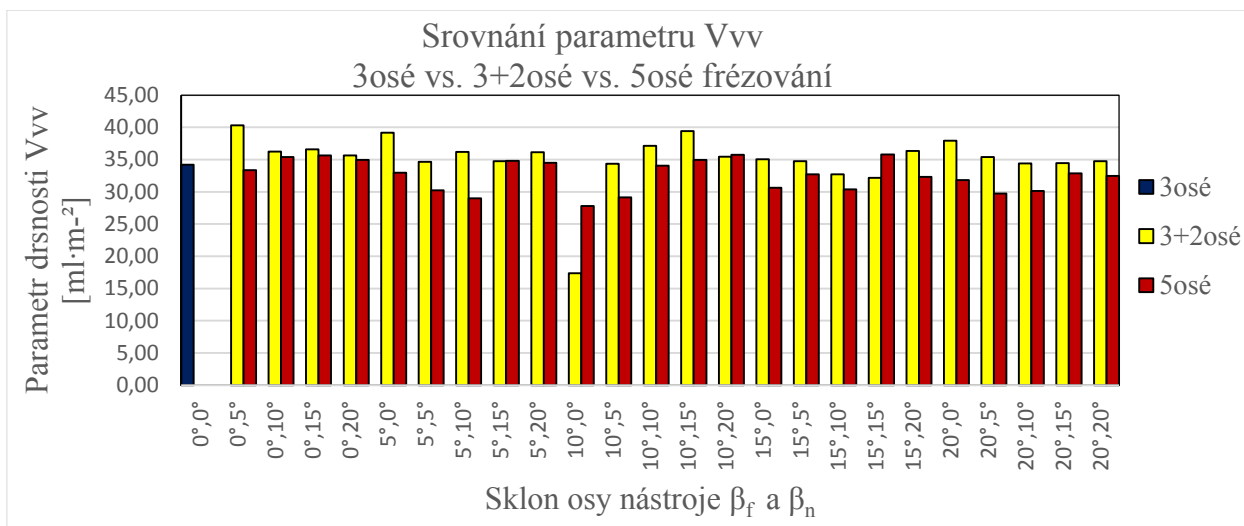
Tabulka 20 Porovnání nejefektivnějších a nejméně efektivních náklonů pro parametr S_{vk}

3+2osé	S_{vk} [μm]	3+2osé	S_{vk} [μm]
$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 10^\circ$	205,53	$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 5^\circ$	445,57
$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 15^\circ$	211,55	$\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 15^\circ$	407,58
5osé			
$\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 5^\circ$	170,13	$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 15^\circ$	309,89
$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 0^\circ$	155,55	$\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 10^\circ$	388,40

Zeleně jsou označeny nejefektivnější náklony naopak ty nejméně efektivní náklony červeně.

7.7.4 Parametr V_{vv}

Z analýzy naměřených hodnot parametru V_{vv} , se jeví jako nejefektivnější náklon $\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 0^\circ$ u 3+2osého frézování. Použitím ostatních náklonů u 3+2osého frézování lze dosáhnout nejnižších hodnot parametru V_{vv} nad $32 \text{ ml} \cdot \text{m}^{-2}$. Použitím 5osého frézování lze dosáhnout nejnižších hodnot pod $30 \text{ ml} \cdot \text{m}^{-2}$.

Obrázek 61 Grafické srovnání parametru drsnosti V_{vv} Tabulka 21 Porovnání nejefektivnějších a nejméně efektivních náklonů pro parametr V_{vv}

3+2osé	V_{vv} [ml·m ⁻²]	3+2osé	V_{vv} [ml·m ⁻²]
$\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 0^\circ$	17,39	$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 5^\circ$	40,31
5osé		5osé	
$\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 0^\circ$	27,78	$\beta_f = 15^\circ, \beta_n = 15^\circ$	35,78

Zeleně jsou označeny nejefektivnější náklony naopak ty nejméně efektivní náklony červeně.

7.7.5 Celkové porovnání náklonů pro údolí plochu 3

Jako nejefektivnější náklon pro údolí plochu 3 k dosažení nejlepší jakosti povrchu, se jeví 3+2osé frézování s náklonem $\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 0^\circ$. Tento náklon předčívá zbylé náklony především v parametrech S_a , S_z a V_{vv} , kde dosahuje citelně nižších hodnot. V tabulce 22 jsou zeleně označeny nejefektivnější náklony naopak ty nejméně efektivní náklony červeně. Přehled všech použitých náklonů pro údolí plochu 3 je uveden v přílohách.

Tabulka 22 Porovnání nejefektivnějších a nejméně efektivních náklonů pro plochu 3 - údolí

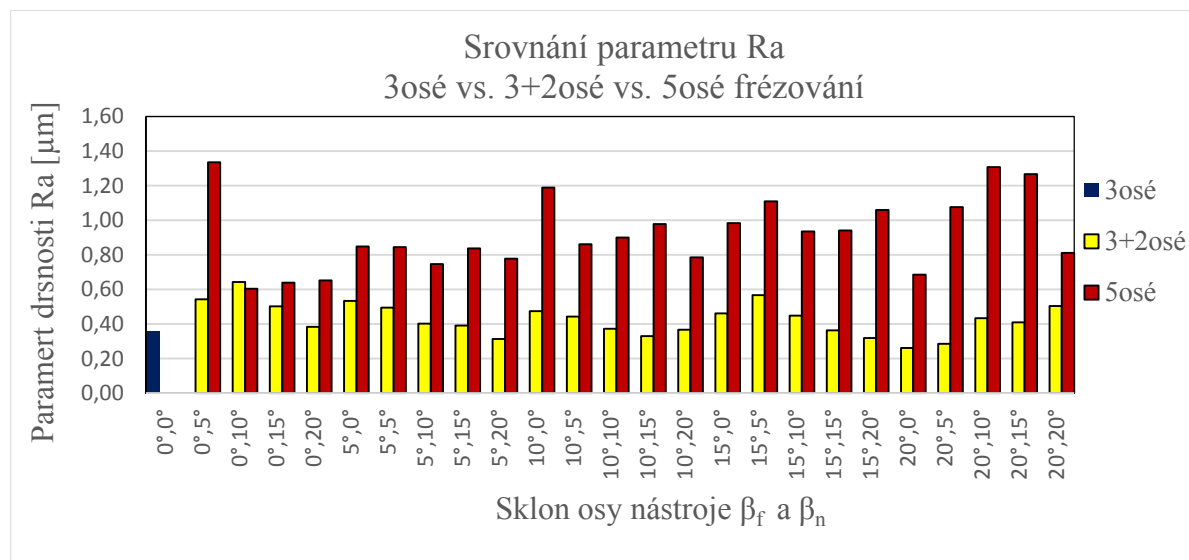
3+2osé	R_a [μm]	R_z [μm]	S_a [μm]	S_z [mm]	S_{vk} [μm]	V_{vv} [ml·m ⁻²]
$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 15^\circ$	0,83	1,58	301,91	1,79	241,38	36,57
$\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 0^\circ$	0,78	1,58	108,80	0,44	267,69	17,38
5osé	R_a [μm]	R_z [μm]	S_a [μm]	S_z [mm]	S_{vk} [μm]	V_{vv} [ml·m ⁻²]
$\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 0^\circ$	1,00	2,82	237,62	1,60	205,51	27,78
$\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 10^\circ$	0,93	2,07	297,90	1,79	388,40	34,06

7.8 Rovinná plocha 4

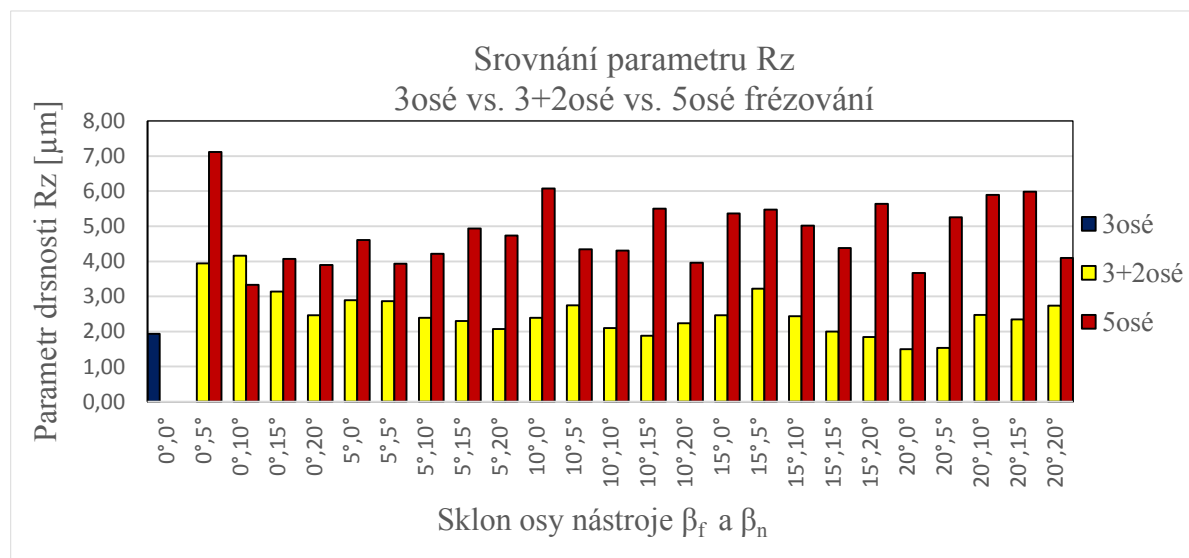
Plochu 4 lze označit jako rovinnou, bez nějakých zakřivení či zaoblení.

7.8.1 Hodnocení profilových parametrů Ra, Rz

Z naměřených hodnot parametrů Ra a Rz lze pozorovat, že použití 3osého a 3+2osého frézování je efektivnější než použití 5osého frézování.



Obrázek 62 Grafické srovnání parametru drsnosti Ra

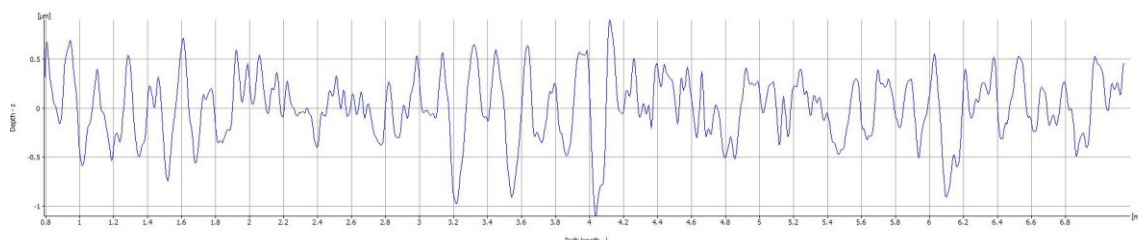


Obrázek 63 Grafické srovnání parametru drsnosti Rz

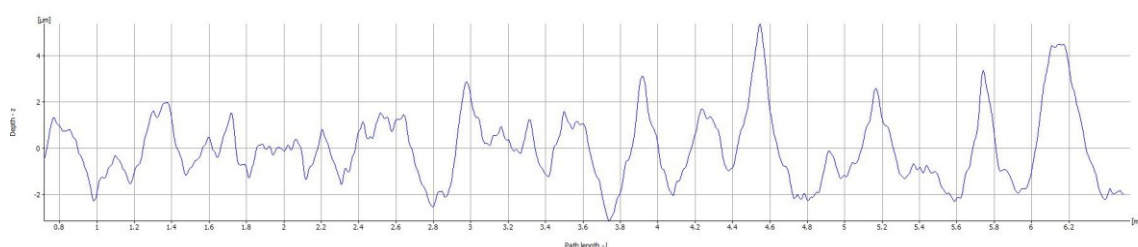
Tabulka 23 Porovnání nejefektivnějších a nejméně efektivních náklonů pro parametry Ra, Rz

3osé	Ra [μm]	Rz [μm]	3osé	Ra [μm]	Rz [μm]
$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 0^\circ$	0,35	1,94	$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 5^\circ$	0,54	3,95
3+2osé			$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 10^\circ$	0,64	4,16
$\beta_f = 5^\circ, \beta_n = 20^\circ$	0,31	2,08	5osé		
$\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 10^\circ$	0,37	2,10	$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 5^\circ$	1,33	7,11
$\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 15^\circ$	0,33	1,88	$\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 0^\circ$	1,19	6,07
$\beta_f = 15^\circ, \beta_n = 15^\circ$	0,36	2,00	$\beta_f = 15^\circ, \beta_n = 0^\circ$	0,98	5,36
$\beta_f = 15^\circ, \beta_n = 20^\circ$	0,32	1,84	$\beta_f = 15^\circ, \beta_n = 5^\circ$	1,11	5,48
$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 0^\circ$	0,26	1,49	$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 5^\circ$	1,08	5,25
$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 5^\circ$	0,29	1,54	$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 10^\circ$	1,31	5,89

Zeleně jsou označeny nejefektivnější náklony naopak ty nejméně efektivní náklony červeně.



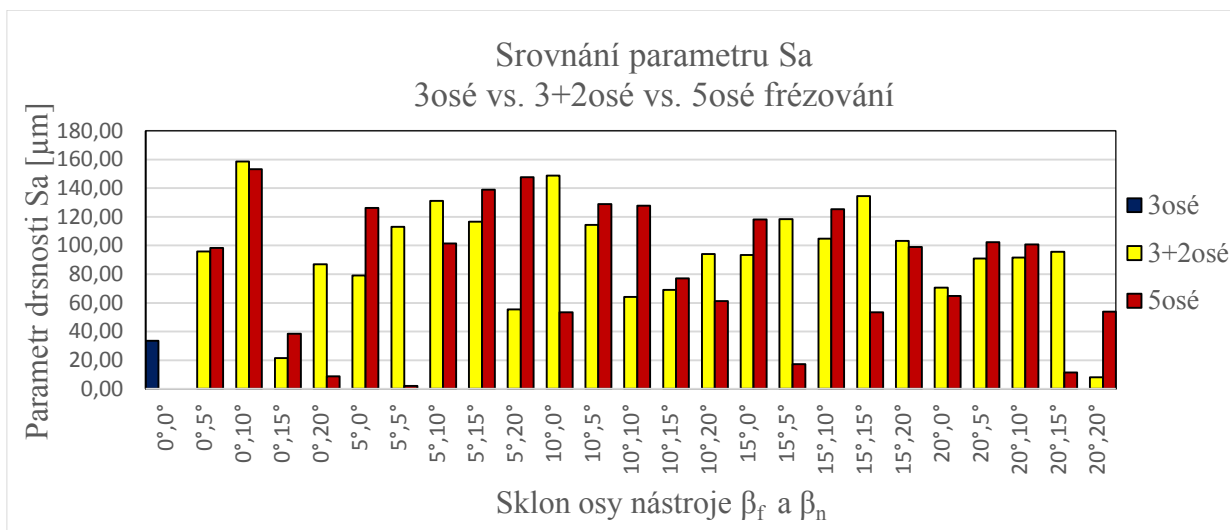
Obrázek 64 Profil drsnosti povrchu po 3+2osém frézování s náklonu $\beta_f = 20^\circ$, $\beta_n = 0^\circ$



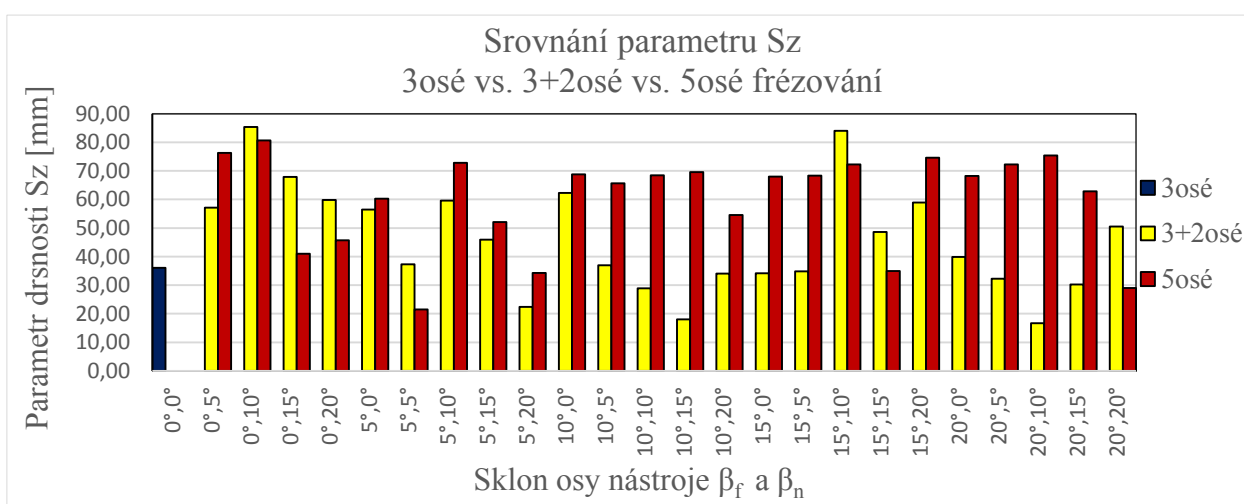
Obrázek 65 Profil drsnosti povrchu po 5osém frézování s náklonu $\beta_f = 10^\circ$, $\beta_n = 0^\circ$

7.8.2 Hodnocení parametrů Sa, Sz

Analýzou naměřených hodnot parametrů Sa a Sz, se jeví jako efektivnější použití 3+2osého frézování. Použitím toho způsobu lze docílit celkově nižších hodnot u obou hodnocených plošných parametrů.



Obrázek 66 Grafické srovnání parametru drsnosti Sa



Obrázek 67 Grafické srovnání parametru drsnosti Sz

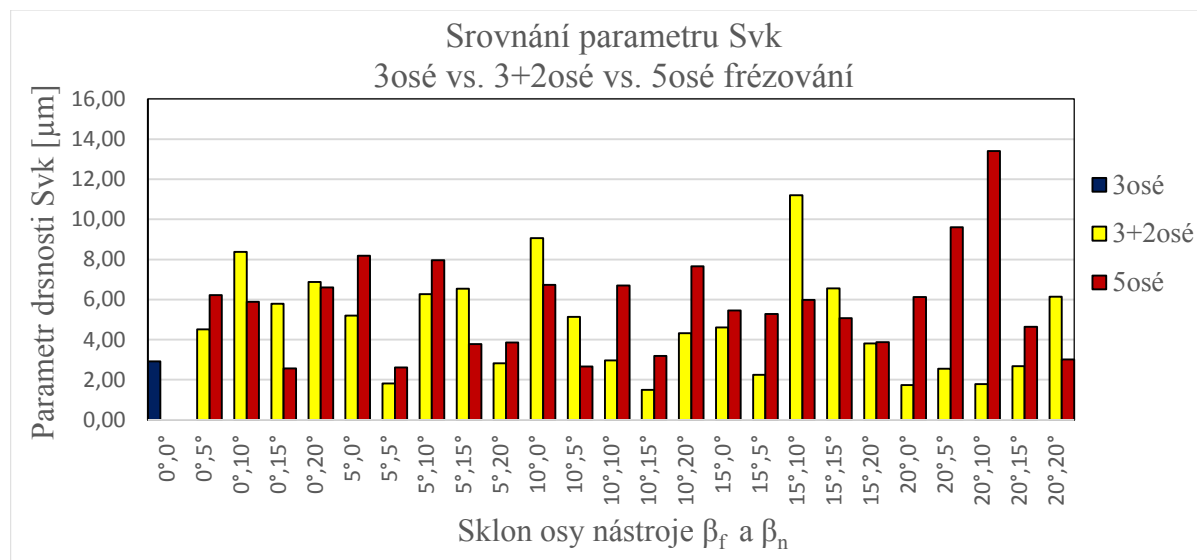
Tabulka 24 Porovnání nejefektivnějších a nejméně efektivních náklonů pro parametry Sa, Sz

3+2osé	Sa [μm]	Sz [μm]	3+2osé	Sa [μm]	Sz [μm]
$\beta_f = 5^\circ$, $\beta_n = 20^\circ$	55,36	22,37	$\beta_f = 0^\circ$, $\beta_n = 10^\circ$	158,89	85,31
$\beta_f = 10^\circ$, $\beta_n = 10^\circ$	64,15	28,89	$\beta_f = 10^\circ$, $\beta_n = 0^\circ$	148,78	62,31
$\beta_f = 10^\circ$, $\beta_n = 15^\circ$	69,12	18,00	5osé		
$\beta_f = 20^\circ$, $\beta_n = 0^\circ$	70,67	39,93	$\beta_f = 0^\circ$, $\beta_n = 5^\circ$	98,22	76,34
5osé			$\beta_f = 0^\circ$, $\beta_n = 10^\circ$	153,22	80,69
$\beta_f = 0^\circ$, $\beta_n = 15^\circ$	38,52	40,98	$\beta_f = 10^\circ$, $\beta_n = 5^\circ$	128,79	65,61
$\beta_f = 0^\circ$, $\beta_n = 20^\circ$	8,83	45,73	$\beta_f = 10^\circ$, $\beta_n = 10^\circ$	127,78	68,46
$\beta_f = 5^\circ$, $\beta_n = 5^\circ$	2,18	21,48	$\beta_f = 20^\circ$, $\beta_n = 5^\circ$	102,40	72,31
$\beta_f = 20^\circ$, $\beta_n = 20^\circ$	53,80	28,98	$\beta_f = 20^\circ$, $\beta_n = 10^\circ$	102,40	75,39

Zeleně jsou označeny nejefektivnější náklony naopak ty nejméně efektivní náklony červeně.

7.8.3 Hodnocení parametru S_{vk}

Analýzou naměřených hodnot parametru S_{vk} , se jeví jako efektivnější použití 3+2osých náklonů. Hned několik náklonů se jeví jako efektivní pro dosažení nízkých hodnot parametru S_{vk} .



Obrázek 68 Grafické srovnání parametru drsnosti S_{vk}

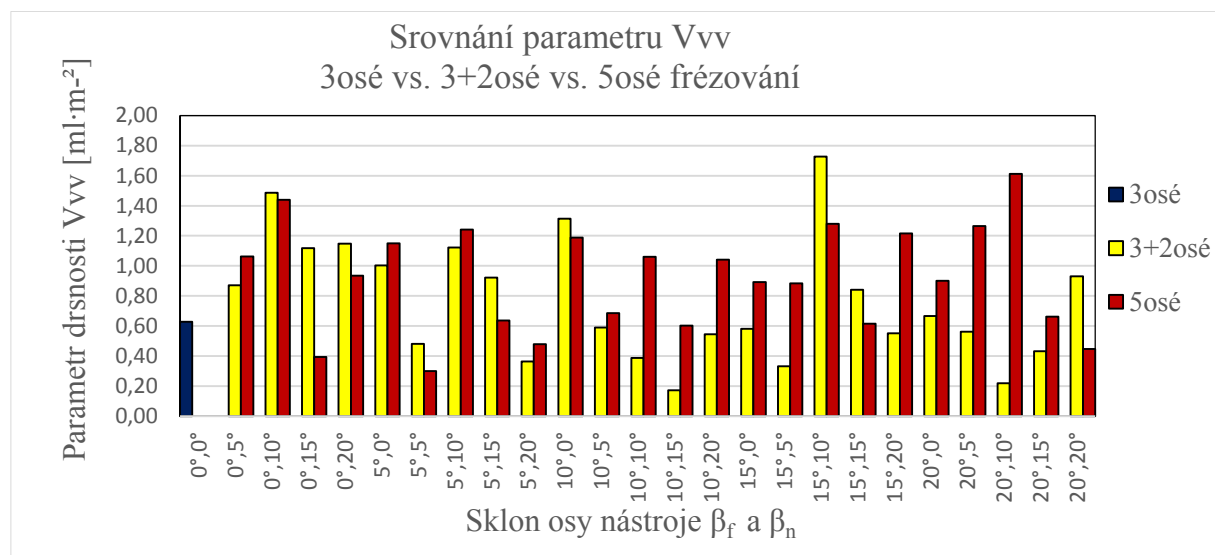
Tabulka 25 Porovnání nejefektivnějších a nejméně efektivních náklonů pro parametr S_{vk}

3+2osé	S_{vk} [μm]	3+2osé	S_{vk} [μm]
$\beta_f = 5^\circ, \beta_n = 5^\circ$	1,81	$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 10^\circ$	8,37
$\beta_f = 5^\circ, \beta_n = 20^\circ$	2,81	$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 20^\circ$	6,88
$\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 10^\circ$	2,97	$\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 0^\circ$	9,07
$\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 15^\circ$	1,50	$\beta_f = 15^\circ, \beta_n = 10^\circ$	11,20
$\beta_f = 15^\circ, \beta_n = 5^\circ$	2,24	5osé	
$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 0^\circ$	1,73	$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 5^\circ$	6,23
$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 5^\circ$	2,54	$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 10^\circ$	5,89
$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 10^\circ$	1,78	$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 20^\circ$	6,60
$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 15^\circ$	2,68	$\beta_f = 5^\circ, \beta_n = 0^\circ$	8,18
5osé		$\beta_f = 5^\circ, \beta_n = 0^\circ$	7,97
$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 15^\circ$	2,57	$\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 20^\circ$	7,65
$\beta_f = 5^\circ, \beta_n = 5^\circ$	2,61	$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 5^\circ$	9,61
$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 20^\circ$	3,02	$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 10^\circ$	13,40

Zeleně jsou označeny nejefektivnější náklony naopak ty nejméně efektivní náklony červeně.

7.8.4 Hodnocení parametru V_{vv}

Analýzou naměřených hodnot parametru V_{vv} , se jeví jako efektivnější použití 3+2osého frézování. V celkovém porovnání naměřených hodnot lze docílit v průměru nižších hodnot parametru V_{vv} , použitím 3+2osého frézování. Hned několik náklonů se jeví jako efektivní pro dosažení nízkých hodnot parametru V_{vv} .



Obrázek 69 Grafické srovnání parametru drsnosti V_{vv}

Tabulka 26 Porovnání nejefektivnějších a nejméně efektivních náklonů pro parametr V_{vv}

3+2osé	V_{vv} [ml·m ⁻²]	3+2osé	V_{vv} [ml·m ⁻²]
$\beta_f = 5^\circ, \beta_n = 5^\circ$	0,48	$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 10^\circ$	1,49
$\beta_f = 5^\circ, \beta_n = 20^\circ$	0,36	$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 15^\circ$	1,12
$\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 10^\circ$	0,39	$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 20^\circ$	1,15
$\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 15^\circ$	0,17	$\beta_f = 5^\circ, \beta_n = 0^\circ$	1,00
$\beta_f = 15^\circ, \beta_n = 5^\circ$	0,33	$\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 0^\circ$	1,31
$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 10^\circ$	0,22	$\beta_f = 15^\circ, \beta_n = 5^\circ$	1,73
5osé		5osé	
$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 15^\circ$	0,39	$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 10^\circ$	1,44
$\beta_f = 5^\circ, \beta_n = 5^\circ$	0,30	$\beta_f = 5^\circ, \beta_n = 10^\circ$	1,24
$\beta_f = 5^\circ, \beta_n = 20^\circ$	0,48	$\beta_f = 15^\circ, \beta_n = 10^\circ$	1,28
$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 20^\circ$	0,45	$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 10^\circ$	1,61

Zeleně jsou označeny nejefektivnější náklony naopak ty nejméně efektivní náklony červeně.

7.8.5 Celkové porovnání náklonů pro rovinnou plochu 4

Při hodnocení rovinné plochy 4 pouze na základě profilových parametrů R_a , R_z lze říci, že použití 3+2osého a 3osého frézování je mnohem efektivnější než použití 5osého frézování. Díky možnosti použití moderní měřicí techniky a možnosti měření plošných (3D) parametrů, se potvrdilo, že použití 3+2osého frézování je efektivní, ale i některé náklony po 5osém frézování vykazují nízké hodnoty plošných parametrů drsnosti povrchu. V tabulce 27 je znázorněno porovnání mezi nejefektivnějšími náklony ty jsou označeny zeleně a naopak ty nejméně efektivní jsou označeny červeně. Přehled všech použitých náklonů pro rovinnou plochu 4 je uveden v přílohách.

Tabulka 27 Porovnání nejefektivnějších a nejméně efektivních náklonů pro rovinou plochu 4

3+2osé	R_a [μm]	R_z [μm]	S_a [μm]	S_z [μm]	S_{vk} [μm]	V_{vv} [$\text{ml}\cdot\text{m}^{-2}$]
$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 10^\circ$	0,64	4,16	158,59	85,31	8,37	1,49
$\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 0^\circ$	0,47	2,39	148,78	62,31	9,07	1,31
$\beta_f = 15^\circ, \beta_n = 10^\circ$	0,45	2,44	104,86	83,98	11,20	1,73
$\beta_f = 5^\circ, \beta_n = 20^\circ$	0,31	2,08	55,36	22,37	2,81	0,36
$\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 10^\circ$	0,37	2,10	64,15	28,89	2,97	0,39
$\beta_f = 10^\circ, \beta_n = 15^\circ$	0,33	1,88	69,12	18,00	1,50	0,17
$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 0^\circ$	0,26	1,49	70,67	39,39	1,73	0,67
$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 10^\circ$	0,47	2,47	91,51	16,69	1,79	0,22
5osé	R_a [μm]	R_z [μm]	S_a [μm]	S_z [μm]	S_{vk} [μm]	V_{vv} [$\text{ml}\cdot\text{m}^{-2}$]
$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 5^\circ$	1,33	7,11	98,22	76,34	6,23	1,06
$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 10^\circ$	0,60	3,33	153,22	80,69	5,89	1,44
$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 5^\circ$	1,08	5,25	102,40	75,31	9,61	1,26
$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 10^\circ$	1,31	5,89	100,80	75,39	13,40	1,61
$\beta_f = 0^\circ, \beta_n = 15^\circ$	0,64	4,07	38,52	40,98	2,57	0,39
$\beta_f = 5^\circ, \beta_n = 5^\circ$	0,84	3,93	2,18	21,48	2,61	0,30
$\beta_f = 20^\circ, \beta_n = 20^\circ$	0,81	4,10	53,80	28,98	3,02	0,45

Závěr

Hlavním cílem diplomové práce bylo zjistit o jaký úhel je nejefektivnější nástroj naklonit tak aby bylo dosaženo co nejprůzračnější drsnosti povrchu. V diplomové práci bylo provedeno měření drsnosti povrchu bezdotykovou metodou pomocí přístroje Alicona InfiniteFocus.

V úvodní části byl popsán aktuální stav 2D a 3D měření drsnosti povrchu. Dále jsou v práci popsány základní informace a rozdíly mezi dotykovým a bezdotykovým měřením drsnosti povrchu. Dále je v diplomové práci uveden přehled plošných a profilových parametrů hodnocení struktury, resp. textury povrchu podle norem ČSN EN ISO.

V experimentální části byla použita bezdotyková metoda měření drsnosti povrchu. Pro experiment byl zvolen polotovár o rozměrech 40×40×25 mm. Jedná se o dobře obrobitelnou slitinu hliníku EN AW-6060 – AlMgSi0,5 F19. Celkově jsem měřil 49 vzorků, které se dají rozdělit do tří skupin. Jednotlivé skupiny se dají rozdělit podle použité metody frézování 3osé, 3+2osé a 5osé frézování. Po obrobení vzorku použitím metody 3osého frézování byl měřen jeden vzorek, 24 vzorků bylo měřeno po obrobení metodou 3+2osého frézování a stejný počet vzorků po obrobení 5osým frézováním.

Na každém vzorku se měřily čtyři plochy. Díky možnosti použití moderní měřicí techniky, jsem mohl měřit i plošné parametry drsnosti povrchu. Klasické hodnocení drsnosti povrchu pomocí profilových parametrů drsnosti se jeví v mnoha praktických příkladech jako nedostačující. Prostorovou analýzou povrchu se otevírají nové možnosti hodnocení struktury povrchu, které byly dvourozměrným měřením nedosažitelné. Komplexnější popis vlastností povrchu je přínosný nejen pro jeho detailnější poznání, ale především rozšířením poznatků o stavu povrchu k jeho funkčnímu chování.

Analýzou naměřených hodnot lze konstatovat tyto závěry:

Rovinné tvarové plochy

- pro rovinné plochy je efektivnější použití **3+2osého a 3osého frézování**, lze dosáhnout až o 50 % nižších hodnot parametrů R_a a R_z než 5osým frézováním,
- na obou měřených rovinných plochách jsou efektivní stejné náklony a to $\beta_f = 20^\circ$, $\beta_n = 10^\circ$ u **3+2osého** a $\beta_f = 5^\circ$, $\beta_n = 5^\circ$ a $\beta_f = 20^\circ$, $\beta_n = 20^\circ$ u **5osého frézování**.

Mírně zaoblená tvarová plocha

- pro frézování mírně zaoblené plochy je efektivnější použití **5osého frézování** než 3+2osého a 3osého frézování, lze docílit až o 10 % nižších hodnot při zhodnocení všech náklonů pro plošné parametry S_a a S_z ,
- při hodnocení parametru S_a jsou nejefektivnější náklony $\beta_f = 15^\circ$, $\beta_n = 5^\circ$ a $\beta_f = 20^\circ$, $\beta_n = 5^\circ$ u **5osého frézování**, kterými lze docílit až o 50 % nižších hodnot (tyto dva náklony jsou i nejefektivnější pro zaoblenou plochu),
- jako neefektivní náklony pro tuto plochu se jeví $\beta_f = 20^\circ$, $\beta_n = 0^\circ$, $\beta_f = 20^\circ$, $\beta_n = 10^\circ$, $\beta_f = 20^\circ$, $\beta_n = 15^\circ$ a $\beta_f = 20^\circ$, $\beta_n = 20^\circ$ jak u 3+2osého i 5osého frézování.

Tvarová plocha údolí

- při hodnocení pouze parametrů drsnosti povrchu R_a , R_z je efektivnější použití **3osého a 3+2osého frézování**, těmito způsoby lze dosáhnout až o 15 % nižších hodnot než 5osým frézováním,
- pro frézování ploch tvaru údolí je jednoznačně nejefektivnější náklon $\beta_f = 10^\circ$, $\beta_n = 0^\circ$ u **3+2osého frézování**,
- z měřených náklonů u 5osého frézování je nejefektivnější náklon $\beta_f = 10^\circ$, $\beta_n = 0^\circ$ (stejný náklon jako u 3+2osého frézování, avšak v porovnání s ním je horší).

Přehled všech použitých náklonů pro tvarové plochy je uveden v přílohách. Kde jsou vyznačeny všechny jednotlivé efektivní a neefektivní náklony pro jednotlivé plochy.

Pro další výzkum v této oblasti by bylo vhodné se zaměřit na odlišné tvarové plochy a provést další měření, popřípadě přidat některé další parametry drsnosti povrchu jako je šikmost, špičatost, materiálový podíl profilu či jiné.

Závěrem lze konstatovat, že požadavky na jakost, resp. drsnost povrchu v posledních letech výrazně rostou a to nejen z hlediska splnění přísnějších kvantitativních požadavků, ale i z hlediska existence nových typů zajímavých povrchů.

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval svému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Markovi Sadílkovi, Ph.D. za poskytnutí cenných rad a informací při zpracování dat. Práce byla podpořena ze Studentské grantové soutěže Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava v rámci projektu SP2018/136 Specifický výzkum v oblasti obrábění a strojírenské metrologie s cílem zvýšit a podpořit vědecko-výzkumné aktivity studentů doktorských a magisterských studijních programů ve spolupráci s akademickými pracovníky.

8. Seznam použité literatury

1. Pokrokové 3D měření a hodnocení povrchu. *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/pokrokové-3d-mereni-a-hodnoceni-povrchu.html>
2. Pokrok v měření a hodnocení struktury povrchu. *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/pokrok-v-mereni-a-hodnoceni-struktury-povrchu.html>
3. Komplexní hodnocení jakosti povrchu. *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/komplexni-hodnoceni-jakosti-povrchu.html>
4. Dotykové, nebo bezdotykové měření struktury povrchu?. *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/dotykové-nebo-bezdotykové-mereni-struktury-povrchu.html>
5. PERNIKÁŘ, Jiří, Josef VAČKÁŘ a Miroslav TYKAL. *Jakost a metrologie*. Brno: CERM, 2001. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-1997-0.
6. TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0672-x.
7. Olympus. *Mikronerovnost a adhezní povrch* [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <https://www.olympus-ims.com/en/metrology/ols4000/>
8. Bezkontaktní měřicí metody v experimentální mechanice. *fsv.cvut.cz* [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <http://departments.fsv.cvut.cz/k102/doktorske-studium/bezkontaktni-merici-metody-v-experimentalni-mechanice?prezentace>
9. Drsnost povrchu [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <https://www.hommel-etamic.cz/files/HOMMEL-CS-plakat-drsnost-uchylky-tvaru.pdf>
10. Attension Applications - Biolin Scientific. *Scientific Instrumentation - Biolin Scientific* [online]. Västra Frölunda: Biolin Scientific Holding AB, 2016 [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <http://www.biolinscientific.com/attension/applications/?card=AA14>
11. What Is Surface Roughness? | Introduction To Roughness | Introduction To Roughness | KEYENCE America. *KEYENCE Global Home* [online]. Ósaka: KEYENCE CORPORATION, 2017 [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <http://www.keyence.com/ss/products/microscope/roughness/line/index.jsp>
12. *Struktura povrchů vybraných strojních součástí* [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/vyuka/Struktura_povrchu_vybranych_tehnologii_obrabeni.pdf
13. Zvýšení kvality hodnocení textury povrchu. *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/zvyseni-kvality-hodnoceni-textury-povrchu.html>

14. Basic Components and Elements of Surface Topography. [online]. 2004 24 [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: http://www.bcmac.com/pdf_files/surface%20finish%20101.pdf
15. KARRER, Jean-Marc. La mesure des états de surface. [online]. 2005, s. 24 [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <http://jm.karrer.free.fr/documents/ES1.pdf>
16. ČSN EN ISO 4287 Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu
17. 3D analýzy a filtrace profilu povrchu. *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/3d-analyzy-a-filtrace-profilu-povrchu.html>
18. Prostorové hodnocení struktury povrchu. *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prostorove-hodnoceni-struktury-povrchu.html>
19. Standardní prostorové hodnocení textury povrchu. *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/standardni-prostorove-hodnoceni-textury-povrchu.html>
20. ČSN EN ISO 25178-2 Geometrické specifikace produktu (GPS) - Textura povrchu: Plocha - Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu
21. EN ISO 25178-2:2012 Geometrical product specifications (GPS) -- Surface texture: Areal -- Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters.
22. *2D parametry drsnosti* [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: https://www.olympus-ims.com/en/knowledge/metrology/roughness/2d_parameter/
23. *Topografické znázornění okolí* [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <http://www.digitalsurf.com/en/guide-areal-feature-parameters.html>
24. ČSN EN ISO 25178-3 Geometrické specifikace produktu (GPS) – Textura povrchu: Plocha – Část 3: Specifikace operátorů
25. MICHIGAN METROLOGY, LLC. [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <http://michmet.com/>
26. Výškové parametry textury povrch. *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vyskove-parametry-textury-povrchu.html>
27. *Souvislosti objemových parametrů* [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <http://docplayer.net/19032059-Optical-3d-measurement-and-its-use-in-minting-alicon-mr-dipl-ing-christian-janko-munze-osterreich-mr-ing-alfred-gnadenberger-29-1.html>
28. *Pokročilé metody vyhodnocování topografie povrchu* [online]. Brno, 2014 [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=86460. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. Vysoké učení technické v Brně.

29. *Porovnání profilových a plošných parametrů povrchu materiálu vytvořeného technologií soustružení*[online]. Ostrava, 2017 [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: <https://dspace.vsb.cz/handle/10084/117303>. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
30. *VÝROBA VSTŘIKOVACÍ FORMY* [online]. BRNO, 2009 [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=14760. DIPLOMOVÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
31. *Konstrukční řešení vstřikovací formy pro plastový díl automobilu* [online]. Zlín, 2014 [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: <http://digilib.k.utb.cz/handle/10563/28467>. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
32. *Vliv kvality povrchu na zatékavost polymerů ve formě* [online]. Zlín, 2011 [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: <https://digilib.k.utb.cz/handle/10563/16454?show=full>. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
33. *Vliv technologických parametrů na zatékavost polymerů* [online]. Zlín, 2017 [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/41577/stan%C4%9Bk_2017_teze.pdf?sequence=2&isAllowed=y. Teze habilitační práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
34. Alicona InfiniteFocus. <https://www.alicon.com/> [online]. [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: <https://www.alicon.com/products/infinitefocus/>
35. Optical Methods of Surface Measurement. <https://www.nist.gov/> [online]. [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: <https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/oles/3-Vorburger-Ted-Optical-Methods-of-Surface-Measurement-MSSF-AA-10jul12.pdf>
36. *Zvyšování přesnosti při frézování tvarových ploch* [online]. 2017 [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/117560/VEC0026_FS_N2301_2303T02_20_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y.%20V%C5%A0B%20%E2%80%93%20Technick%C3%A1%20univerzita%20Ostrava.. Diplomová práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava.
37. Roughness Measurements with InfiniteFocus. <https://www.integrita.zcu.cz> [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: https://www.integrita.zcu.cz/download/skola1/alicon_prez.pdf

9. Seznam příloh

Příloha A – Seznam všech náklonů s naměřenými hodnotami

Příloha B – ZIP: výstupy z měření Alicony IF (obrázky, histogramy a tabulky)